

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности*

*1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики
состояния объектов» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.314.2
ББК 34.9
О-23

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «03» мая 2023 г.,
протокол № 9

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ. Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Обработка измерительной информации» для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» очной формы обучения.

Учебное издание

ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 21.08.2023 . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,75. Тираж 26 экз. Заказ № 882.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Введение	4
1 Моделирование электронных цепей и сигналов с использованием специализированных компьютерных программ. Изучение программ Multisim, Matlab	5
2 Спектральный анализ периодических сигналов с использованием специализированных компьютерных программ	10
3 Компьютерное моделирование однотональной амплитудной модуляции.....	12
4 Компьютерное моделирование угловой модуляции.....	16
5 Компьютерное моделирование электронных схем для преобразования сигналов. Линейные и нелинейные преобразователи сигналов.....	20
6 Дискретизация и квантование аналоговых сигналов. Спектр дискретного сигнала. Восстановление сигналов рядом Котельникова.....	24
7 Проектирование цифровых фильтров.....	29
8 Изучение специализированных компьютерных программ для регистрации и обработки изображений в неразрушающем контроле.....	37
9 Анализ цифровых изображений, отражающих результаты неразрушающего контроля объектов. Термограммы. Рентгенограммы.....	39
10 Анализ цифровых изображений, отражающих результаты неразрушающего контроля объектов. Эхограммы.....	41
Список литературы	44

Введение

Общение людей друг с другом, их взаимоотношения с внешним миром, их производственная, научная и общественная деятельность тесно связаны с информационными процессами – процессами восприятия, передачи, обработки, поиска, хранения и отображения информации. Без обмена информацией невозможно управление различными объектами, организация производственной, научной и общественной жизни человека.

Целью изучения дисциплины «Обработка измерительной информации» является формирование у студентов четких представлений о целях, задачах и методах обработки измерительной информации в неразрушающем контроле. В результате обработки измерительная информация об объекте контроля представляется в форме, удобной для восприятия, хранения и дальнейшего преобразования. Для этого необходимо осуществить выделение информативного сигнала и подавление шумов и помех, преобразование и передачу сигнала по каналу связи от датчика к приемному устройству, оцифровывать сигнал и обработать цифровую информацию в микропроцессоре, вывести численную информацию или цифровое изображение на экран устройства отображения информации.

В данной дисциплине рассматриваются теоретические основы анализа сигналов, построение аналоговых и цифровых систем обработки измерительной информации, принципы визуализации измерительной информации в неразрушающем контроле.

Целью лабораторных работ по дисциплине «Обработка измерительной информации» является формирование у студентов навыков анализа сигналов измерительной информации в приборах неразрушающего контроля.

1 Моделирование электронных цепей и сигналов с использованием специализированных компьютерных программ. Изучение программ Multisim, Matlab

Цель работы: изучение возможности моделирования электронных цепей и сигналов с использованием программ Multisim, Matlab.

1.1 Основные теоретические положения

Разработка любого устройства включает физическое или математическое моделирование. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, т. к. требует изготовления макетов и их трудоемкое исследование. Иногда чисто физическое моделирование просто невозможно из-за сложности устройства. В этом случае прибегают к математическому моделированию с использованием средств и методов вычислительной техники.

Программный продукт Multisim представляет собой средство разработки и моделирования электронных схем. Окно программы Multisim представлено на рисунке 1.1 [1].

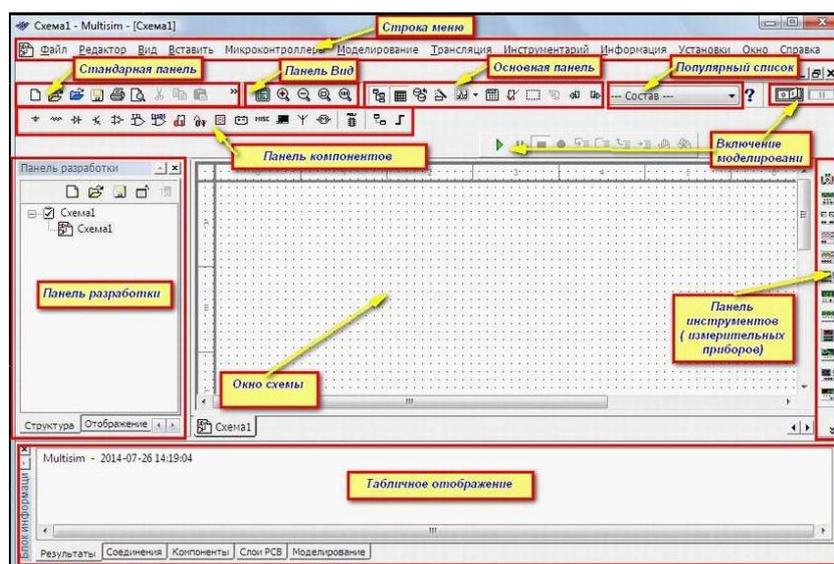


Рисунок 1.1 – Окно программы Multisim

Интерфейс Multisim состоит из таких базовых элементов, как стандартная инструментальная панель, меню, инструментальная панель компонентов, панель разработки, панель вида, панель симуляции, основная модель, панель инструментов, окно схемы, вид ячеек, прокрутка влево/вправо.

Подробно работа с программой Multisim рассмотрена в курсе «Электроника».

Matlab – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов.

С помощью Matlab можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения [1].

Основное окно среды Matlab представлено на рисунке 1.2.

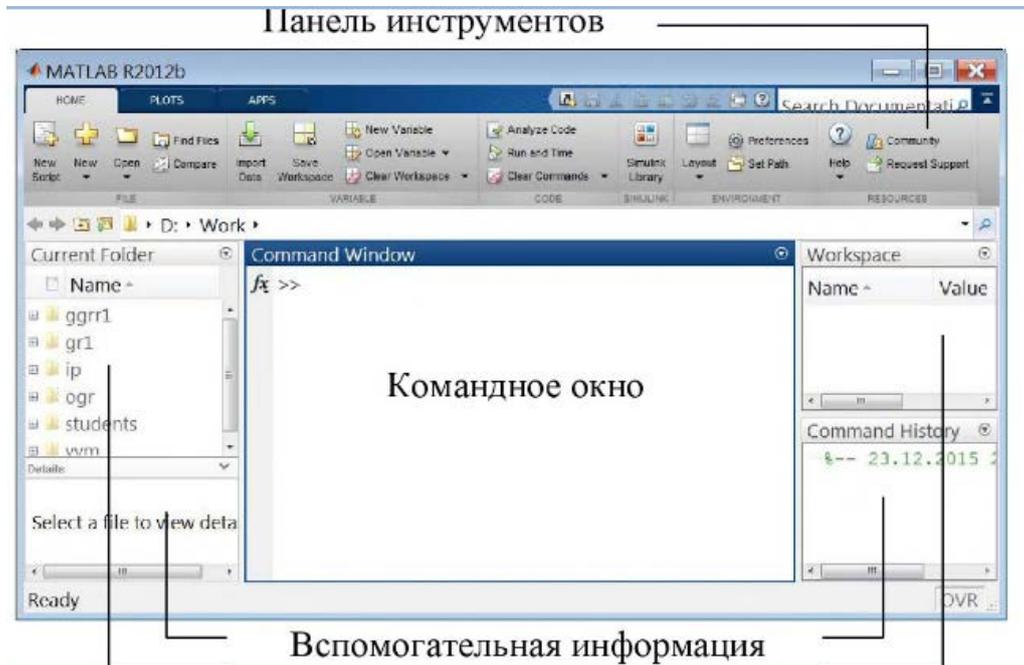


Рисунок 1.2 – Основное окно среды Matlab версии 2012 и выше

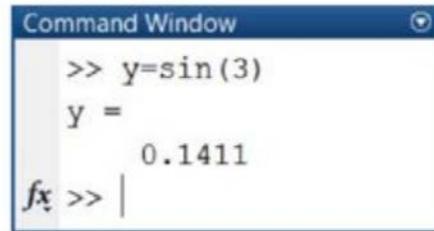
Основное окно среды Matlab состоит из трех различных по функциональному назначению частей (см. рисунок 1.2): панель инструментов (верхняя часть), командное окно (центральная часть) и окна со вспомогательной информацией (справа и слева от командного окна).

Панель инструментов среды Matlab версии 2012 и выше содержит кнопки для управления средой, тематически сгруппированные на трех вкладках: Home, Plots, Apps (см. рисунок 1.2). Кнопки на каждой из вкладок расположены на нескольких панелях. На панелях вкладки Home расположены следующие кнопки:

- панель File (содержит основные операции по управлению файлами);
- панель Variable (содержит основные операции по управлению переменными в командном окне);
- панель Code (содержит основные операции по управлению программным кодом);
- панель Simulink (позволяет запускать библиотеку Simulink);
- панель Environment (содержит основные операции по управлению средой Matlab);
- панель Resources (содержит основные операции для получения справочной информации).

На панелях вкладки Plots расположены кнопки для построения различных графиков и диаграмм. На панелях вкладки Apps расположены кнопки для использования специальных пакетов и библиотек.

Программный код вводится в активной строке, отмеченной символом `>>`. Результаты выводятся в пустой строке после каждого фрагмента кода, не запрещающего отображение результата (рисунок 1.3).

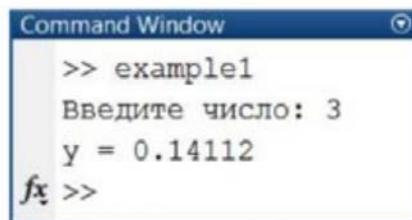


```

Command Window
>> y=sin(3)
y =
    0.1411
fx >> |
  
```

Рисунок 1.3 – Результаты вычисления в командном окне Matlab

Командное окно среды также используется для отображения результатов выполнения программ, записанных в *m*-файлах (сценариях, функциях). В этом случае вывод результатов выполнения записанной в *m*-файле программы может начинаться с отображения названия файла (рисунок 1.4).



```

Command Window
>> example1
Введите число: 3
y = 0.14112
fx >>
  
```

Рисунок 1.4 – Результаты выполнения в командном окне Matlab записанной в *m*-файле программы

Инициировать выполнение программы можно, написав в командном окне название *m*-файла, в котором она хранится.

Пакет моделирования динамических систем Simulink в состав математического пакета Matlab и является удобным инструментом для исследования различных задач и систем, в том числе и для исследования задач динамики систем, представленных в виде блок-схем. Модель исследуемой системы представляется в виде *S*-модели и сохраняется в файле с расширением *slx*.

Модели создаются по технологии Drag-and-Drop (перетяни и оставь) из отдельных блоков (модулей). Сами модули хранятся в библиотеках программного модуля Simulink, которые имеют иерархическую структуру и могут расширяться пользователем за счет разработки собственных блоков.

Для запуска Simulink необходимо ввести команду `simulink` в окне Command Window (рисунок 1.5) или нажать кнопку  на панели инструментов.

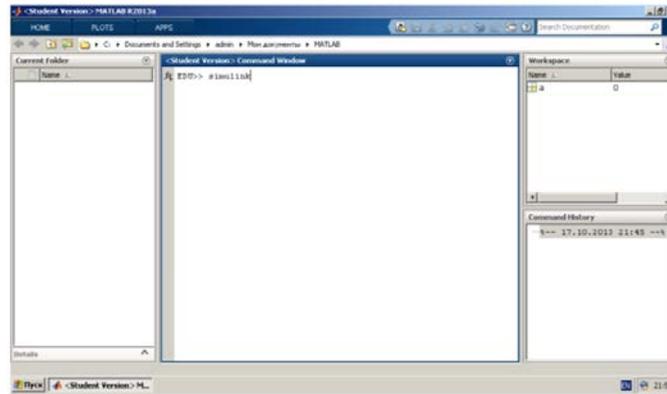


Рисунок 1.5 – Запуск Simulink

После загрузки появится библиотека элементов Simulink. Для создания новой модели необходимо запустить Matlab с помощью команды Home ⇒ New ⇒ Simulink Model (для версии с меню – это команда File ⇒ New ⇒ Model), в результате откроется новое пустое окно untitled (рисунок 1.6), в котором будет осуществляться сборка S-модели.

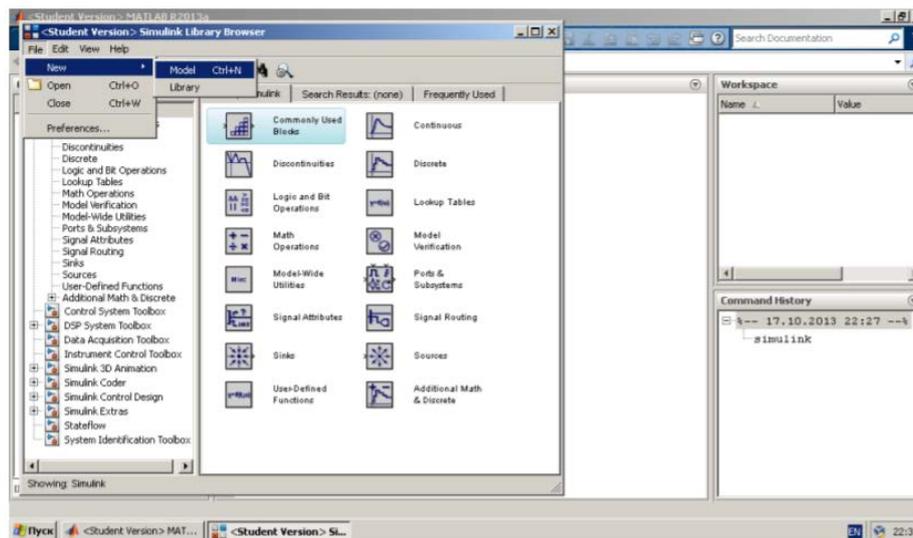


Рисунок 1.6 – Создание новой модели

Окно библиотеки Simulink Library Browser можно открыть с помощью кнопки , в левой части представлен перечень Simulink-библиотек, входящих в состав установленной конфигурации программного модуля Simulink. В правой части окна на закладке Library: Simulink в зависимости от выбранной библиотеки помещаются соответствующие пиктограммы ее разделов. Чтобы раскрыть перечень разделов какой-либо из библиотек, следует выполнить двойной щелчок на ее имени.

Блоки располагаются 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.

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 редактирования параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков требуется выполнить соединение элементов схемы. Для этого необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу мыши, провести линию ко входу другого блока. После чего отпустить клавишу. Если соединение не создано, то линия связи будет пунктирной и иметь красный цвет. 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 клавишу мыши, протянуть линию.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File Save As... в окне схемы и указав папку и имя файла.

1.2 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с основными теоретическими сведениями о программе Matlab.

2 Даны величины $x = 1,5$; $y = 2$; $z = 3$. По заданию преподавателя вычислить a , b .

3 Ознакомиться с основными теоретическими сведения о пакете моделирования Simulink.

4 Рассмотреть моделирование оптимального фильтра для обнаружения прямоугольного сигнала на фоне помех.

1.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: цель работы, результаты вычисления величин a , b , модель фильтра в среде Simulink, выводы.

Контрольные вопросы

1 Приведите примеры научно-исследовательских и инженерных задач, которые могут быть решены в программе Matlab.

2 Назовите и поясните основные компоненты рабочей среды Matlab.

3 Для чего используется Simulink?

4 Какие блоки используются в Simulink для создания модели?

5 Какие настройки существуют в Simulink?

6 Как создать проект и запустить его на исполнение?

2 Спектральный анализ периодических сигналов с использованием специализированных компьютерных программ

Цель работы: изучение специализированных компьютерных программ для спектрального анализа периодических сигналов; проведение спектрального анализа простейших периодических сигналов.

2.1 Основные теоретические сведения

1 *Математическое описание сигналов.* Под сигналом понимают физический процесс, отображающий некоторую информацию или сообщение.

Аналоговые сигналы (АС) описываются непрерывной (или кусочно-непрерывной) функцией $x(t)$, причем сама функция и аргумент t могут принимать любые значения на некоторых интервалах времени [2–4].

Дискретные сигналы (ДС) описываются решетчатыми функциями – последовательностями – $x(nT)$, где $T = \text{const}$ – интервал дискретизации; n – целое, $n = 0, 1, 2, \dots$; сама функция $x(nT)$ может в дискретные моменты nT принимать произвольные значения на некотором интервале. Эти значения функции называются выборками, или отсчетами функции [2–4].

Последовательность $x(nT)$ может быть и конечной, состоящей из определенного конечного числа отсчетов: $x(0) = 1, x(T) = -2, x(2T) = 3$; конечную последовательность можно записать в форме $x(nT) = \{1, -2, 3\}$ [2–4].

Цифровые сигналы (ЦС) представляют собой квантованные по уровню дискретные сигналы и описываются квантованными решетчатыми функциями (квантованными последовательностями) $x(nT)$, принимающими в дискретные моменты nT лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования h_1, h_2, \dots, h_N .

2 *Специализированные компьютерные программы для анализа спектра сигнала.* FourierScore – программа для построения радио сигналов и их спектрального анализа. Данная программа позволяет при помощи быстрого преобразования Фурье программа получает частотный, фазовый и энергетический спектры исследуемого сигнала. FourierScore заменяет целый комплекс радиоприборов: генератор сигналов, модулятор, осциллограф и спектрограф. Редактор программы позволяет моделировать сигналы, как простой геометрической формы, так и представленные сложными функциями, а также применять к ним модуляцию.

SpectraLAB – двухканальный анализатор спектра. Программа работает с любой Windows, совместимой звуковой картой, и обеспечивает спектральный анализ в режиме реального времени, а также возможности записи, воспроизведения и пост-обработки. Она позволяет измерять частотную характеристику, искажения и переходную характеристику. Утилита генератора сигналов вырабатывает розовый/белый шум, свип-сигнал, тоны и импульсы.

LabVIEW представляет собой среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами.

В системе Matlab для анализа спектра сигнала используется интерактивная оболочка SPTool.

Процедура SPTool активизирует графическую интерактивную оболочку пакета Signal, включающую:

- средство поиска и просмотра сигналов – Signal Browser;
- проектировщик фильтров – Filter Designer;
- средство просмотра характеристик фильтров – Filter Viewer;
- средство просмотра спектра – Spectrum Viewer.

Оболочка активизируется путем ввода в командном окне Matlab команды SPTool. Окно SPTool состоит из трех областей – Signals (сигналы), Filters (фильтры) и Spectra (спектры), под каждой из которых имеются кнопки, указывающие на то, что можно сделать с объектами, расположенными в этих областях. Чтобы обрабатывать какие-либо сигналы с помощью SPTool, прежде всего необходимо сформировать эти сигналы с помощью некоторой программы Matlab, а затем импортировать полученные векторы значений этих сигналов в среду SPTool.

Для того чтобы найти оценки спектральных свойств сигналов после их ввода в SPTool, необходимо в области сигналов окна SPTool отметить нужный сигнал и нажать кнопку Create в нижней части окна. После этого на экране появится окно Spectrum Viewer. В левой части окна расположены элементы настройки, которые, в частности, позволяют выбрать метод нахождения спектральной характеристики сигнала (Method). В качестве метода в работе необходимо использовать FFT (Быстрое преобразование Фурье). Для проведения вычислений после выбора метода следует использовать кнопку Apply ниже левого поля.

2.2 Порядок выполнения работы

1 С использованием среды Matlab необходимо произвести анализ спектров различных видов сигналов:

- синусоидальных колебаний;
- последовательности треугольных импульсов;
- прямоугольных колебаний без смещения;
- последовательности пилообразных импульсов.

Для этого в программном пакете Simulink необходимо построить схему, представленную на рисунке 2.1.

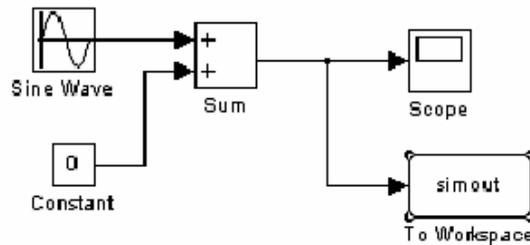


Рисунок 2.1 – Схема исследования

В ходе лабораторной работы необходимо получить спектры всех четырех видов сигналов при различных частотах дискретизации и сравнить их.

Исходные данные для моделирования взять у преподавателя.

2.3 Требования к отчету

Отчет по работе должен содержать следующее: цель работы, структурные схемы для исследования спектров сигналов, результаты моделирования в виде рисунков исходных сигналов и их спектров, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается различие дискретного и цифрового сигналов?
- 2 В чем заключается суть спектрального анализа сигналов?
- 3 Что такое спектр сигнала?
- 4 Какими основными свойствами обладают спектры сигналов?
- 5 Как влияет изменение скважности на спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов?
- 6 Как изменится спектр периодического сигнала, если период повторения устремить в бесконечность?
- 7 Как определить число гармонических составляющих в спектре импульсного сигнала?
- 8 Как изменится форма сигнала, если из спектра периодического пилообразного колебания удалить четные гармоники?

3 Компьютерное моделирование однотоновой амплитудной модуляции

Цель работы: проведение компьютерного моделирования однотоновой амплитудной модуляции и изучение спектра полученного сигнала.

3.1 Основные теоретические сведения

Модуляцией называется процесс управления одним или несколькими параметрами колебаний высокой частоты в соответствии с законом

передаваемого сообщения. При модуляции происходит процесс наложения одного колебания (передаваемого сообщения) на другое колебание, называемое несущим. Частота несущих колебаний должна быть на один и более порядков выше частоты модулирующего сигнала [4].

Описание модулированных сигналов возможно как с помощью временного, так и спектрального методов.

В наиболее общем виде информационный сигнал можно представить в виде модулированного колебания:

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] = A(t) \cos \psi(t), \quad (3.1)$$

где $A(t)$, $\varphi(t)$ – информационные параметры передаваемого сигнала, изменяющиеся во времени соответствующим образом.

Схема формирования модулированного сигнала приведена на рисунке 3.1.

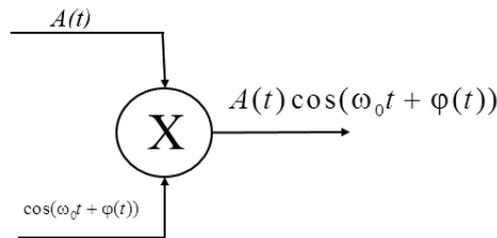


Рисунок 3.1 – Схема формирования модулированного сигнала

При использовании амплитудной модуляции огибающая несущего колебания изменяется по закону, определяемому функцией $A(t)$, а значения начальной фазы и частоты несущего колебания поддерживаются постоянными:

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_0]. \quad (3.2)$$

В простейшем случае, называемом тональной амплитудной модуляцией, в качестве модулирующего сигнала выбирается колебание вида

$$A(t) = A_0 \left(1 + M \cos(\Omega t + \varphi_{\Omega_0}) \right), \quad (3.3)$$

где M – коэффициент амплитудной модуляции, определяемый по формуле

$$M = \frac{A_{AM \max} - A_{AM \min}}{A_{AM \max} + A_{AM \min}}.$$

Итоговое колебание может быть описано следующей функцией:

$$s(t) = (A_0 + A(t))\cos[\omega_0 t + \varphi_0] = A_0 \left(1 + M \cos(\Omega t + \varphi_{\Omega_0})\right) \cos[\omega_0 t + \varphi_0]. \quad (3.4)$$

Значение M должно находиться в пределах от 0 до 1 для всех гармоник модулирующего сигнала. При значении $M < 1$ форма огибающей несущего колебания полностью повторяет форму модулирующего сигнала $A(t)$. Малую глубину модуляции для основных гармоник модулирующего сигнала ($M \ll 1$) применять нецелесообразно, т. к. при этом мощность передаваемого информационного сигнала будет много меньше мощности несущего колебания.

Стопроцентная модуляция ($M = 1$) может приводить к искажениям сигналов. При $M > 1$ возникает так называемая перемодуляция. Форма огибающей при перемодуляции искажается относительно формы модулирующего сигнала и после демодуляции, если применяются ее простейшие методы, информация может искажаться [4].

Начальные фазы несущего и информационного сигнала в данном случае принципиального значения не имеют, поэтому для улучшения наглядности формулы их можно опустить:

$$s(t) = A_0 \cos[\omega_0 t] + \frac{A_0 M}{2} \cos\{(\omega_0 + \Omega)t\} + \frac{A_0 M}{2} \cos\{(\omega_0 - \Omega)t\}. \quad (3.5)$$

Формула (3.5) наглядно показывает, что в спектре амплитудно-модулированного сигнала, по сравнению со спектрами несущего колебания и информационного сигнала, происходят определенные изменения, а именно: модулирующее колебание с частотой Ω перемещается в область частоты ω_0 и расщепляется на два колебания, симметричные относительно частоты ω_0 с частотами соответственно, $(\omega_0 + \Omega)$ – верхняя боковая частота; $(\omega_0 - \Omega)$ – нижняя боковая частота. Изменение фазы происходит аналогичным образом: начальная фаза модулирующего колебания для верхней боковой частоты складывается с начальной фазой несущей, а для нижней боковой – вычитается из фазы несущей.

Амплитуды этих двух колебаний одинаковы и составляют величину

$$A_H = A_B = 0,5MA_0.$$

Средняя мощность АМ-сигнала определяется по формуле

$$P_{AM} = 0,5A_0^2 + 0,25M^2 A_0^2.$$

Здесь первое слагаемое характеризует среднюю мощность несущего колебания, а второе – суммарную среднюю мощность боковых составляющих.

3.2 Порядок выполнения работы

1 Задано аналитическое выражение амплитудно-модулируемого колебания:
 $s(t) = A_0(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$, $\Omega = 2\pi F$, $\omega_0 = 2\pi f$.

Рассчитать параметры амплитудно-модулированных колебаний (амплитуды гармоник) в соответствии с вариантом, заданным преподавателем. Построить график спектра амплитуд, определить распределение мощности по спектральным составляющим.

2 Собрать схему для создания модулированного сигнала в среде Simulink (рисунок 3.2). Провести моделирование, определить параметры полученных сигналов.

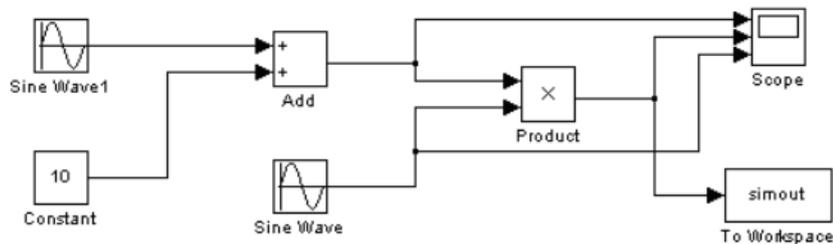


Рисунок 3.2 – Схема модели для среды Simulink

3.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: расчеты гармоник АМ-сигнала, результаты моделирования в среде Matlab, выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите классификацию видов модуляции.
- 2 Каким выражением описывается амплитудно-модулированный сигнал?
- 3 Что такое коэффициент глубины модуляции АМ-сигнала?
- 4 Нарисуйте спектр АМ-сигнала и поясните его состав.
- 5 Чем отличаются сигналы балансной модуляции от сигналов однополосной амплитудной модуляции?
- 6 Как получить спектральные характеристики сигналов?
- 7 Как получить числовые значения спектральных характеристик?
- 8 Как измерить параметры сигналов по осциллограмме виртуального осциллографа?
- 9 От чего зависит распределение мощности в спектре однотонового АМ-сигнала?
- 10 Объясните принцип построения векторной диаграммы АМ-сигнала.

4 Компьютерное моделирование угловой модуляции

Цель работы: проведение компьютерного моделирования угловой модуляции и изучение спектра полученного сигнала.

4.1 Основные теоретические сведения

Модуляцией называется процесс управления одним или несколькими параметрами колебаний высокой частоты в соответствии с законом передаваемого сообщения. При модуляции происходит процесс наложения одного колебания (передаваемого сообщения) на другое колебание, называемое несущим. Частота несущих колебаний должна быть на один и более порядков выше частоты модулирующего сигнала [2, 4].

Кроме амплитуды, в несущем колебании можно изменять такие параметры, как частота ω_0 и начальная фаза φ_0 . Так как в этих случаях происходит линейное влияние на аргумент функции \cos , а сам аргумент гармонического колебания $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ определяет мгновенное значение фазы (фазового угла), такие сигналы получили название *сигналов с угловой модуляцией* (УМ; angle modulation). Если в несущем колебании изменяется частота ω_0 , то имеем дело с *частотной модуляцией* (ЧМ), если же изменяется начальная фаза φ_0 – *фазовой модуляцией* (ФМ). По существу, различие между фазовой и частотной модуляцией заключается лишь в том, как именно мгновенная фаза $\varphi(t)$ связана с модулирующим сигналом. Чтобы оценить связь частотной модуляции с фазовой, введем понятие *мгновенной частоты* (*instantaneous frequency*), равной производной от полной фазы по времени: $\omega(t) = d\psi / dt$.

При частотной модуляции мгновенное значение несущей частоты $\omega(t)$ связано с модулирующим сигналом $A(t)$ зависимостью

$$\omega(t) = \omega_0 + k_f A(t), \quad (4.1)$$

где k_f – размерный коэффициент пропорциональности между частотой и напряжением.

Рассмотрим одностороннюю частотную модуляцию, когда модулирующий сигнал – гармоническое колебание $A(t) = A_0 \cos \Omega t$, у которого для упрощения начальная фаза $\theta_0 = 0$. Пусть и начальная фаза несущего колебания $\varphi_0 = 0$. При необходимости начальные фазы θ_0 и φ_0 легко можно ввести в окончательные соотношения. Полную фазу ЧМ-сигнала в любой момент времени t определим путем интегрирования мгновенной частоты, выраженной через формулу (4.1):

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \int_0^t (\omega_0 + k_f A_0 \cos \Omega t) dt = \omega_0 t + \frac{\omega_{\text{дч}}}{\Omega} \sin \Omega t = \omega_0 t + m_f \sin \Omega t, \quad (4.2)$$

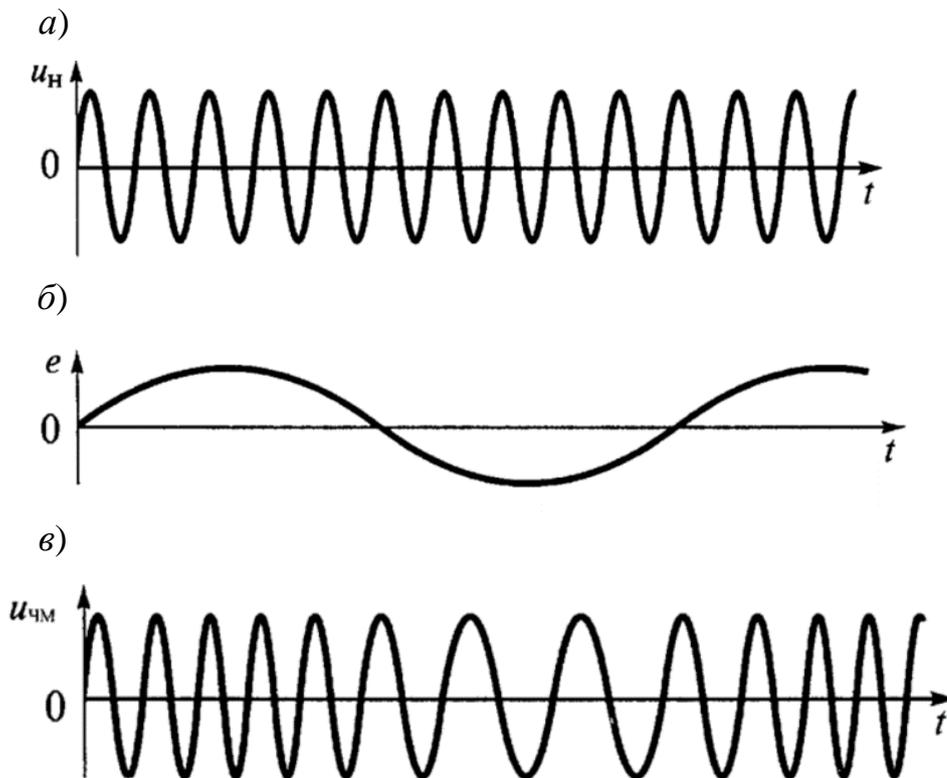
где $\omega_{\partial\psi}$ – максимальное отклонение частоты от значения ω_0 , или девиация частоты при частотной модуляции, $\omega_{\partial\psi} = k_f A_0$;

m_f – максимальное отклонение от текущей фазы $\omega_0 t$ или девиация фазы несущего колебания (индекс частотной модуляции), $m_f = \frac{\omega_{\partial\psi}}{\Omega} = \frac{k_f A_0}{\Omega}$. Данный параметр определяет интенсивность колебаний начальной фазы сигнала.

С учетом соотношений (4.1) и (4.2) частотно-модулируемый сигнал запишется в следующем виде:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_n \cos \psi(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t). \quad (4.3)$$

На рисунке 4.1 представлены упрощенные временные диаграммы сигналов при частотной модуляции.



a – несущее колебание; $б$ – модулирующий сигнал; $в$ – ЧМ-сигнал

Рисунок 4.1 – Частотная однотоновая модуляция

Несущее колебание $u_n(t)$ с начальной фазой $\theta_0 = 90^\circ$ показано на рисунке 4.1, a , модулирующий сигнал $A(t)$ с начальной фазой $\varphi_0 = 90^\circ$ – на рисунке 4.1, $б$ и полученный в процессе частотной модуляции ЧМ-сигнал – на рисунке 4.1, $в$.

Спектр сигнала с частотной модуляцией зависит от индекса модуляции.

При малом индексе модуляции $m \ll 1$ спектр сигнала определяется следующей формулой (вывод формулы опущен):

$$\begin{aligned} u_{\text{ЧМ}}(t) &= U_{\text{н}} \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t) = U_{\text{н}} \cos \omega_0 t - U_{\text{н}} m \sin \Omega t \cdot \sin \omega_0 t = \\ &= U_{\text{н}} \cos \omega_0 t + 0.5 U_{\text{н}} m \cos(\omega_0 + \Omega)t - 0.5 U_{\text{н}} m \cos(\omega_0 - \Omega)t. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Сравнение формул для частотной и амплитудной модуляции показывает, что по аналитической записи спектр ЧМ-сигнала при однотоновой модуляции напоминает спектр АМ-сигнала и также состоит из несущего колебания и двух боковых составляющих с частотами $(\omega_0 + \Omega)$ и $(\omega_0 - \Omega)$, причем и амплитуды их рассчитываются аналогично (только вместо коэффициента амплитудной модуляции M в формуле для ЧМ-сигнала фигурирует индекс угловой модуляции m).

Спектр сигнала при $m > 1$. В этом случае спектр сигнала определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} u_{\text{ЧМ}}(t) &= U_{\text{н}} J_0(m) \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} U_{\text{н}} J_n(m) \cos(\omega_0 + n\Omega)t + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n U_{\text{н}} J_n(m) \cos(\omega_0 - n\Omega)t, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $J_n(m)$ – функции Бесселя.

Спектр ЧМ-сигнала с однотоновой модуляцией при индексе модуляции $m > 1$ состоит из множества высокочастотных гармоник: несущего колебания и бесконечного числа боковых составляющих с частотами $\omega_0 + n\Omega$ и $\omega_0 - n\Omega$, расположенными попарно и симметрично относительно несущей частоты ω_0 .

В ФМ-сигнале полная фаза несущего колебания изменяется пропорционально модулирующему сигналу:

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_{\phi} A(t), \quad (4.6)$$

где k_{ϕ} – размерный коэффициент пропорциональности.

При однотоновой модуляции фаза несущего колебания определяется следующим соотношением:

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_{\phi} A_0 \cos \Omega t. \quad (4.7)$$

Из (4.7) следует, что, как и в случае частотной модуляции, полная фаза несущего колебания при фазовой модуляции изменяется по гармоническому закону. Максимальное отклонение фазы несущего колебания от начальной фазы характеризует *индекс фазовой модуляции*

$$m_{\phi} = kA_0. \quad (4.8)$$

ФМ-сигнал имеет следующий вид:

$$u_{\phi M}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + k_{\phi} A_0 \sin \Omega t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_{\phi} \cos \Omega t). \quad (4.9)$$

Дифференцируя (4.9) по времени, определяем мгновенную частоту ФМ-сигнала:

$$\omega(t) = \psi(t) / dt = \omega_0 - m\Omega \sin \Omega t = \omega_0 - \omega_{\Delta\phi} \sin \Omega t. \quad (4.10)$$

$\omega_{\Delta\phi} = m\Omega = kA_0\Omega$ – максимальное отклонение частоты от значения несущей ω_0 , т. е. девиация фазы при фазовой модуляции.

4.2 Порядок выполнения работы

1 Задано аналитическое выражение ЧМ-сигнала $u_{\text{ЧМ}}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_{\phi} \sin \Omega t)$, $\Omega = 2\pi F$, $\omega_0 = 2\pi f$. По заданию преподавателя определить практическую ширину спектра, рассчитать амплитуды гармоник и построить график спектра амплитуд в пределах практической ширины спектра.

Провести исследование частотной и фазовой модуляции в среде Multisim. Собрать схему в соответствии с рисунком 4.2.

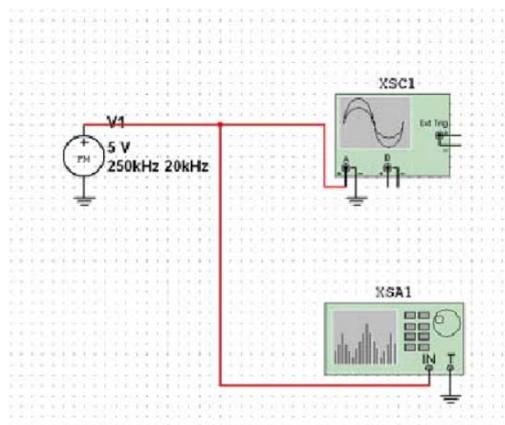


Рисунок 4.2 – Схема частотного модулятора

В соответствии с заданием преподавателя провести исследование сигнала и его спектра.

Зарисовать полученные осциллограммы и спектрограммы.

2 Установить частоту модуляции ЧМ-колебания $F = f / 200$ и, изменяя девиацию частоты от 0 % до 10 %. Определить индексы модуляции $K_{ЧМ}$, при которых амплитуда несущей принимает минимальные значения.

3 Установить частоту модуляции в соответствии с заданием преподавателя и, уменьшая девиацию частоты, определить индекс модуляции $K_{ЧМ}$, при котором амплитуды гармоник с номером выше 1 становятся менее 5 % от первой.

4 Разработать в среде Multisim схему для исследования фазовой модуляции.

Провести исследование фазового сдвига в зависимости от амплитуды модулирующего колебания. Зарисовать полученные осциллограммы. Сделать выводы по результатам моделирования.

5 Разработать в среде Matlab схемы для исследования фазовой и частотной модуляции. В соответствии с заданием преподавателя провести исследование сигналов и их спектра. Сравнить результаты расчетов и моделирования в различных средах.

4.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: расчеты гармоник ФМ-сигнала, результаты моделирования в среде Multisim и Matlab, выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите классификацию видов модуляции.
- 2 Что такое угловая модуляция?
- 3 Запишите выражение для частотной модуляции сигнала.
- 4 Как определяется коэффициент модуляции при фазовой и частотной модуляции?
- 5 Запишите выражение для фазовой модуляции.
- 6 Что такое девиация частоты и фазы?
- 7 Как изменяется спектр сигнала при частотной модуляции?
- 8 Как изменяется спектр сигнала при фазовой модуляции?

5 Компьютерное моделирование электронных схем для преобразования сигналов. Линейные и нелинейные преобразователи сигналов

Цель работы: проведение компьютерного моделирования линейных и нелинейных преобразователей сигналов.

5.1 Основные теоретические сведения

Сигналы, в любой форме материального представления, содержат определенную полезную информацию. Если при преобразованиях сигналов происходит нарушение заключенной в них информации (частичная утрата,

количественное изменение соотношения информационных составляющих или параметров и т. п.), то такие изменения называются *искажениями* сигнала. Если полезная информация остается неизменной или адекватной содержанию во входном сигнале, то такие изменения называются *преобразованиями* сигнала.

Любые изменения сигналов сопровождаются изменением их спектра, и по характеру этого изменения разделяются на два вида: линейные и нелинейные. К *нелинейным* относят изменения, при которых в составе спектра сигналов появляются новые гармонические составляющие, отсутствующие во входном сигнале (модуляция). При *линейных* изменениях сигналов изменяются амплитуды и/или начальные фазы гармонических составляющих спектра. И линейные, и нелинейные изменения сигналов могут происходить как с сохранением полезной информации, так и с ее искажением. Это зависит не только от характера изменения спектра сигналов, но и от спектрального состава самой полезной информации [2].

1 *Схема интегрирования на базе операционного усилителя.* Принцип интегрирования основан на зависимости напряжения на конденсаторе от тока через него:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt. \quad (5.1)$$

Если поддерживать неизменным ток через конденсатор, например $i_c = I_c = \text{const}$, то напряжение U_c будет линейной функцией $U_c = \frac{1}{C} I_c t_u$, где t_u – время интегрирования.

Получить почти безошибочное интегрирование входного напряжения в соответствии с указанным принципом можно, используя свойство операционного усилителя поддерживать токи входной цепи I_R и цепи отрицательной обратной связи I_C . Интеграторы на ОУ получили широкое распространение в измерительной технике как основа генераторов линейно изменяющихся напряжений в схемах разверток осциллографов, в устройствах аналого-цифровых преобразователей, фильтрах. Простейшая схема интегратора представлена на рисунке 5.1.

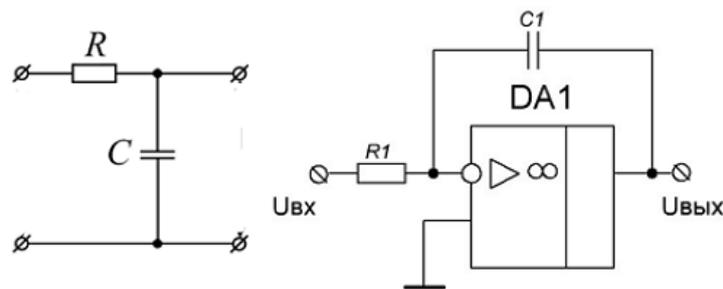


Рисунок 5.1 – Схема активного интегратора на ОУ

В данной схеме в цепь отрицательной обратной связи включен конденсатор C . Тогда для «идеального» ОУ можно записать

$$I_R = \frac{U_{\text{вх}}}{R} = I_C = -C \frac{dU_C}{dt} = -C \frac{dU_{\text{вых}}}{dt}. \quad (5.2)$$

После интегрирования получим

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (5.3)$$

2 *Схема дифференцирования на базе операционного усилителя.* Схема дифференциатора на базе операционного усилителя представлена на рисунке 5.2.

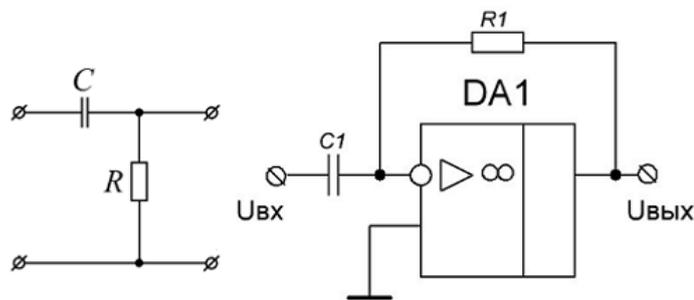


Рисунок 5.2 – Схема активного дифференциатора на ОУ

В данной схеме дифференциатора конденсатор C включается вместо входного резистора R .

Для «идеального» ОУ можно считать, что ток конденсатора

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} = I_R = -\frac{U_{\text{вых}}}{R}. \quad (5.4)$$

Выходное напряжение в данном случае

$$U_{\text{вых}} = -RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}. \quad (5.5)$$

5.2 Порядок выполнения работы

1 Провести исследование работы дифференцирующего усилителя.

Для исследования ОУ, работающего в режиме дифференцирующего усилителя, собрать в системе Multisim и промоделировать схему, представленную на рисунке 5.3.

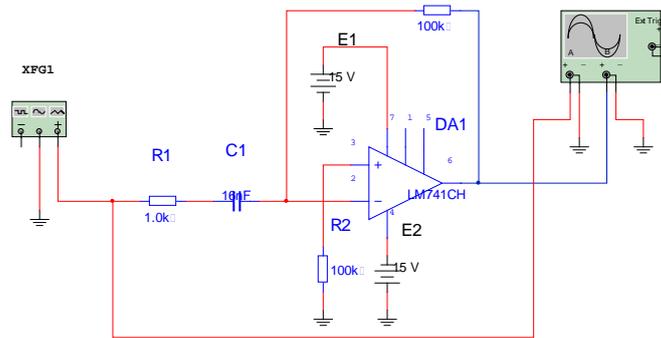


Рисунок 5.3 – Схема исследования дифференцирующего усилителя на ОУ

2 Снять АЧХ коэффициента усиления (зависимость коэффициента усиления от частоты $K(f) = U_{вых}/U_{вх}$) в диапазоне частот ($10..10^4$) Гц при входном гармоническом сигнале амплитудой $U_{вх} = 10$ мВ.

3 Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов дифференцирующего усилителя при подаче на его вход: гармонического сигнала; последовательности треугольных импульсов; последовательности прямоугольных импульсов, от генератора импульсов с частотой 50 Гц и амплитудой 100 мВ. Сравнить сигналы на входе и выходе усилителя.

4 Провести исследование интегрирующего усилителя. Для исследования ОУ, работающего в режиме интегрирующего усилителя, собрать в системе Multisim и промоделировать схему, представленную на рисунке 5.4.

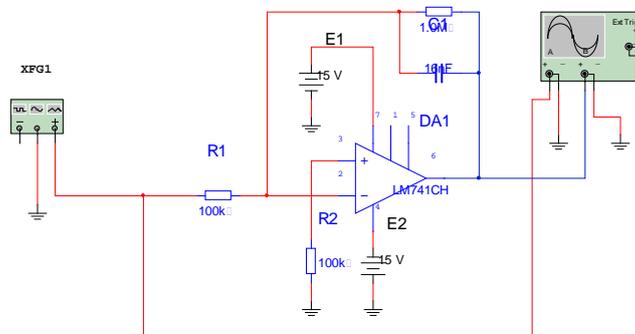


Рисунок 5.4 – Схема исследования интегрирующего усилителя на ОУ

5 Повторить п. 2 при входном сигнале от генератора с амплитудой 1 В.

6 Повторить п. 2 на частотах 1 кГц и 100 Гц. Объяснить изменение формы выходного сигнала и причину уменьшения амплитуды выходного сигнала с увеличением частоты сигнала на входе.

5.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: исследуемые схемы, АЧХ рассматриваемых устройств, осциллограммы сигналов, выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие преобразования сигналов относятся к линейным?
- 2 Какие преобразования сигналов относятся к нелинейным?
- 3 Опишите работу дифференцирующего усилителя на ОУ.
- 4 Опишите работу интегрирующего усилителя на ОУ.
- 5 Как влияет конденсатор в цепи обратной связи интегратора на сигнал на выходе устройства?

6 Дискретизация и квантование аналоговых сигналов. Спектр дискретного сигнала. Восстановление сигналов рядом Котельникова

Цель работы: изучение основ дискретизации и восстановления сигналов по теореме Котельникова; получение спектра дискретного сигнала.

6.1 Основные теоретические положения

Первым этапом цифровой обработки сигналов является дискретизация. В результате дискретизации непрерывный сигнал заменяется отсчетами, взятыми через определенные, обычно равные интервалы времени. При этом очень важным оказывается выбор интервала дискретизации. При большом интервале дискретизации быстрые изменения непрерывного сигнала могут остаться незамеченными. Выбор малого интервала дискретизации ведет к увеличению числа отсчетов и тем самым к увеличению времени обработки. Задача о выборе интервала дискретизации наиболее просто решается при помощи теоремы, доказанной В. А. Котельниковым в 1933 г. Эта теорема устанавливает условия точного восстановления мгновенных значений сигнала по его отсчетам, взятым через равные промежутки времени [4–6].

Сигнал $s(t)$ и спектральная характеристика $S(\omega)$ взаимно однозначно связаны прямым и обратным преобразованиями Фурье:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt; \quad (6.1)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (6.2)$$

Пусть спектральная характеристика $S(\omega)$ равна нулю при $\omega < -\omega_g$ и $\omega > \omega_g$. В этом случае ее можно преобразовать в периодическую с периодом $W = 2\omega_g$ и представить в виде комплексного ряда Фурье. Заменяя в формуле комплексного ряда Фурье переменную t на ω и период T на $W = 2\omega_g$, получим

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{jn \frac{2\pi}{W} \omega}, \quad (6.3)$$

где A_n – коэффициенты разложения в комплексный ряд Фурье,

$$A_n = \frac{2}{W} \int_{-\omega_g}^{\omega_g} S(\omega) e^{jn \frac{2\pi}{W} \omega} d\omega = \frac{1}{\omega_g} \int_{-\omega_g}^{\omega_g} S(\omega) e^{jn \frac{\pi}{\omega_g} \omega} d\omega.$$

При сравнении правых частей выражений (6.2) и (6.3) видно, что

$$A_n = \frac{2\pi}{\omega_g} s(-n\pi / \omega_g) = 2Ts(-nT),$$

где $T = \pi / \omega_g$.

При этом спектральная характеристика (6.3) примет вид

$$S(\omega) = T \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(-nT) e^{jnT\omega} = T \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) e^{-jnT\omega}. \quad (6.4)$$

Подставим формулу (6.4) под знак интеграла в (6.2). Меняя порядок действия интегрирования и суммирования в полученном выражении и вычисляя интегралы, найдём

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_g}^{\omega_g} T \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) e^{-jnT\omega} e^{j\omega t} d\omega = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_g}^{\omega_g} s(nT) e^{j\omega(t-nT)} d\omega = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{T}{\pi} s(nT) \frac{\sin \omega_g(t-nT)}{\omega_g(t-nT)}. \end{aligned}$$

С учетом (6.3) окончательно получим

$$s(t) = s(nT) \frac{\sin \omega_g(t-nT)}{\omega_g(t-nT)}. \quad (6.5)$$

На основании изложенного В. А. Котельниковым была сформулирована следующая теорема.

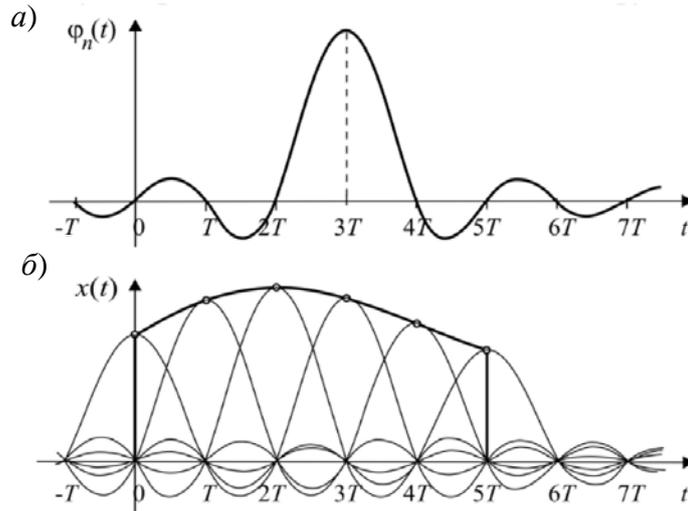
Любую функцию $s(t)$, содержащую гармонические составляющие с частотами от 0 до ω_g , можно представить в виде ряда (6.5) и, наоборот, любая функция, представленная формулой (6.5), содержит лишь гармонические составляющие с частотами от 0 до ω_g .

Полученную формулу (6.5) можно рассматривать как разложение сигнала $s(t)$ по функции

$$\varphi_n(t) = \frac{\sin \omega_s(t - nT)}{\omega_s(t - nT)}, \quad (6.6)$$

причем в качестве коэффициентов ряда выступают значения сигнала $s(t)$ в дискретные моменты времени $t_n = nT$, $n \in (-\infty; +\infty)$.

Функция $\varphi_n(t)$, называемая отсчетной функцией, отображает собой колебания с максимальным значением при $t_n = nT$ (на рисунке 6.1, а представлен график отсчетной функции для $n = 4$).



а – отсчетная функция; б – составляющие ряда

Рисунок 6.1 – Представление сигнала в виде ряда Котельникова

В другие дискретные моменты времени функция равна нулю. Легко проверить, что отсчетные функции ортогональны на интервале времени, т. е.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n(t) \varphi_m(t) dt = \begin{cases} d_n & \text{при } n = m; \\ 0 & \text{при } n \neq m, \end{cases}$$

где $d_n = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\sin \omega_s(t - nT)}{\omega_s(t - nT)} \right] dt = \frac{\pi}{\omega_s} = T$.

Представление функции $s(t)$ рядом (6.5) показано на рисунке 6.1, б. В каждой точке $t = nT$ только один член ряда, стоящего в правой части выражения (6.5), отличен от нуля и этот член равен $s(nT)$. В промежутках между указанными точками точное значение функции $s(t)$ обеспечивается суммированием бесконечного числа функций вида (6.6).

При практическом использовании теоремы Котельникова для восстановления непрерывного сигнала по его отсчетам необходимо учитывать

следующее. Сигналы с ограниченным спектром, для которых справедлива теорема, бесконечны во времени. Реальные же сигналы ограничены по времени интервалом $[0, T_c]$ и обладают, следовательно, неограниченным по времени спектром. Однако всегда можно выделить интервал частот $[0, \omega_g]$, в котором заключена основная часть энергии сигнала, а на долю составляющих спектра с частотой $\omega > \omega_g$ приходится малая часть энергии сигнала [3–6].

Сигнал, ограниченный по времени, приближенно описывается рядом (6.5), состоящим из конечного числа членов:

$$s_N^*(t) = \sum_{n=0}^N s(nT) \frac{\sin \omega_g(t - nT)}{\omega_g(t - nT)}. \quad (6.7)$$

При суммировании членов ряда (6.6) сигнал $s(t)$ воспроизводится точно только в точках отсчета $t_n = nT$. В промежутках между отсчетами возникает ошибка аппроксимации, величина которой зависит от отбрасываемой части спектра сигнала. Чтобы уменьшить ошибку, интервал дискретизации T рекомендуют принимать в 2–5 раз меньше.

6.2 Порядок выполнения работы

1 В работе исследуется сигнал $s(t)$, представляющий собой одиночный импульс заданной формы (задание выдает преподаватель).

Для заданного импульса требуется определить период дискретизации, граничную частоту ω_g , построить амплитудную спектральную характеристику. По этой характеристике определяется граница интервала ω_g , в котором заключена основная часть энергии сигнала (рисунок 6.2).

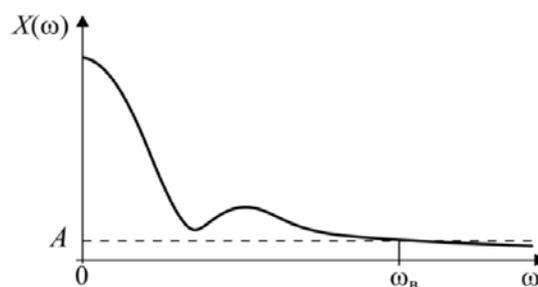


Рисунок 6.2 – Определение границы частотного интервала

Значение ω_g находится из условия, что при $\omega > \omega_g$ выполняется неравенство $S(\omega) \leq A$, где A – заданная величина.

2 Найти спектральную характеристику отсчетной функции

$$\varphi_n(t) = \frac{\sin \omega_g(t - nT)}{\omega_g(t - nT)}.$$

Построить ее для произвольного значения n и $T = \pi/\omega_g = 1$.

3 Сформировать в среде Matchcad математическую модель сигнала $s(t)$, заданного преподавателем. Построить график функции $s(t)$.

4 Составить программу расчета спектральной характеристики

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$$

заданного сигнала $s(t)$. Построить амплитудную спектральную характеристику.

5 По амплитудной спектральной характеристике $S(\omega)$ определить значение частоты ω_g из условия, что $S(\omega) \leq 0,05 \max S(\omega)$ при $\omega > \omega_g$.

6 Определить интервал дискретизации Котельникова $T = \pi/\omega_g$ и сформировать дискретную последовательность

$$x(n) = x(nT), \quad n = 0, 1, \dots, N = T_c / T,$$

где T_c – интервал определения заданного сигнала $s(t)$.

7 Составить программу расчета сигнала $s_N^*(t)$, восстанавливаемого из дискретной последовательности $x(nT)$, $n = 0, 1, \dots, N$, при помощи ряда Котельникова. Построить на одном рисунке графики функций $s(t)$ и $s_N^*(t)$.

8 Сформировать сигнал ошибки $\varepsilon(t) = s(t) - s_N^*(t)$. Определить максимальную абсолютную ошибку

$$\varepsilon_{\max} = \max |\varepsilon(t)|.$$

6.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: разработанные программы по определению основных характеристик исследуемого сигнала, полученные результаты выполнения программ, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как осуществляется дискретизация непрерывного сигнала по времени?
- 2 Покажите, что отсчетные функции $\varphi_n(t)$ ортогональны на интервале времени $(-\infty, \infty)$.
- 3 Как изменяются отсчетные функции $\varphi_n(t)$ при уменьшении (увеличении) периода дискретизации?
- 4 Как выглядит спектральная характеристика отсчетной функции?

5 Что понимают под числом степеней свободы сигнала $s(t)$?

6 Какие методы, кроме ряда Котельникова, используются для восстановления сигнала по его отсчетам в дискретные моменты времени?

7 Проектирование цифровых фильтров

Цель работы: изучение методов синтеза цифровых фильтров и основ их проектирования в среде Matlab.

7.1 Основные теоретические положения

Фильтр – это устройство или программа, которая обеспечивает частотно зависимые преобразования входного сигнала. Для фильтра низких частот устройства или программы должны обеспечивать отсутствие амплитудных искажений входного сигнала в области частот от 0 до некоторой заданной ω_C и эффективное подавление частот, которые превышают граничную частоту ω_C .

Цифровой фильтр (линейная дискретная система) – это алгоритм обработки дискретного сигнала, допускающий операции умножения его элементов на число, задержку на целое число тактов и сложение (рисунок 7.1) [3, 6].

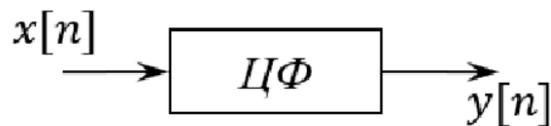


Рисунок 7.1 – К определению цифрового фильтра

Цифровые фильтры имеют ряд принципиальных отличий от аналоговых. Основное отличие заключается в том, что в аналоговых фильтрах входной и выходной сигналы $x(t)$ и $y(t)$ являются непрерывными функциями времени, а в цифровых – дискретными последовательностями цифровых отсчетов соответствующих сигналов $x_T(t) = x_k$, $y_T(t) = y_k$

В общем случае цифровой фильтр (см. рисунок 7.1) описывается линейным разностным уравнением

$$y[n] = \sum_{k=0}^N a_k x[n-k] + \sum_{k=1}^N b_k x[n-k], \quad (7.1)$$

где $x[n]$, $y[n]$ – сигналы на входе и выходе цифрового фильтра соответственно;

N – порядок цифрового фильтра;

$\{a_k\}_{k=0}^N$, $\{b_k\}_{k=1}^N$ – коэффициенты цифрового фильтра.

Если заданы начальные условия

$$\begin{aligned}x[-1] &= x_{-1}; x[-2] = x_{-2}; \dots; x[-N] = x_{-N}; \\y[-1] &= y_{-1}; y[-2] = y_{-2}; \dots; y[-N] = y_{-N},\end{aligned}$$

то решение разностного уравнения единственно.

В дальнейшем рассматривают случаи, когда начальные условия нулевые:

$$\begin{aligned}x[-1] &= 0; x[-2] = 0; \dots; x[-N] = 0; \\y[-1] &= 0; y[-2] = 0; \dots; y[-N] = 0.\end{aligned}\tag{7.2}$$

Нулевые начальные условия для $x[n]$ означают, что рассматривают воздействия на цифровой фильтр, которые отличны от нуля только при неотрицательных $n \geq 0$.

К основным характеристикам линейных цифровых фильтров относятся:

- импульсная характеристика $h[k]$;
- передаточная функция $H(z)$;
- комплексная частотная характеристика $H(e^{j\omega T})$;
- амплитудно-частотная $A(\omega T)$ и фазо-частотная $\varphi(\omega T)$ характеристики.

Краткая классификация цифровых фильтров представлена на рисунке 7.2.

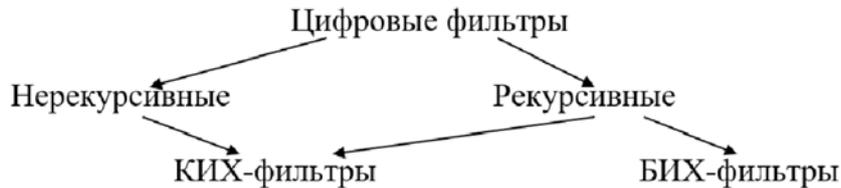


Рисунок 7.2 – Классификация цифровых фильтров

Нерекурсивным называется цифровой фильтр, в котором значения дискретного сигнала на выходе зависят только от значений дискретного сигнала на входе. Нерекурсивный цифровой фильтр описывается неполным разностным уравнением вида [3, 6]

$$y[k] = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k).\tag{7.3}$$

Рекурсивным называется цифровой фильтр, в котором значения дискретного сигнала на выходе зависят как от значений дискретного сигнала на входе, так и от предшествующих значений дискретного сигнала на выходе. Рекурсивный цифровой фильтр описывается полным разностным уравнением (7.1) [3, 6].

Наглядное изображение алгоритма преобразования входного дискретного сигнала в выходной называют схемой цифрового фильтра.

КИХ-фильтром или фильтром с конечной импульсной характеристикой называется такой цифровой фильтр, все элементы импульсной характеристики которого начиная с некоторого номера равны нулю, т. е. существует $n_0 \in \mathbb{N}$ такой, что $h[n] \Big|_{n > n_0} = 0$.

Цифровые фильтры, не обладающие указанным свойством, называются БИХ-фильтрами или цифровыми фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой.

Нерекурсивный цифровой фильтр всегда является КИХ-фильтром. Более того, элементы его импульсной характеристики совпадают с элементами последовательности его коэффициентов.

Методы синтеза цифровых фильтров можно классифицировать по различным признакам.

По типу получаемого фильтра:

- методы синтеза *рекурсивных* фильтров;
- методы синтеза *нерекурсивных* фильтров.

По наличию аналогового прототипа:

- методы синтеза *с использованием* аналогового прототипа;
- *прямые* (без использования аналогового прототипа) методы синтеза.

Синтез фильтров можно проводить и в двух приложениях: FDATool и SPTool.

2 Синтез фильтра в программе FDATool. Эта программа вызывается следующей командной строкой [1]:

```
>> fdatool
```

Она открывает окно (рисунок 7.3) с множеством полей и иных деталей интерфейса для выбора типа и его параметров, а также для выбора средств визуализации проектирования фильтров.

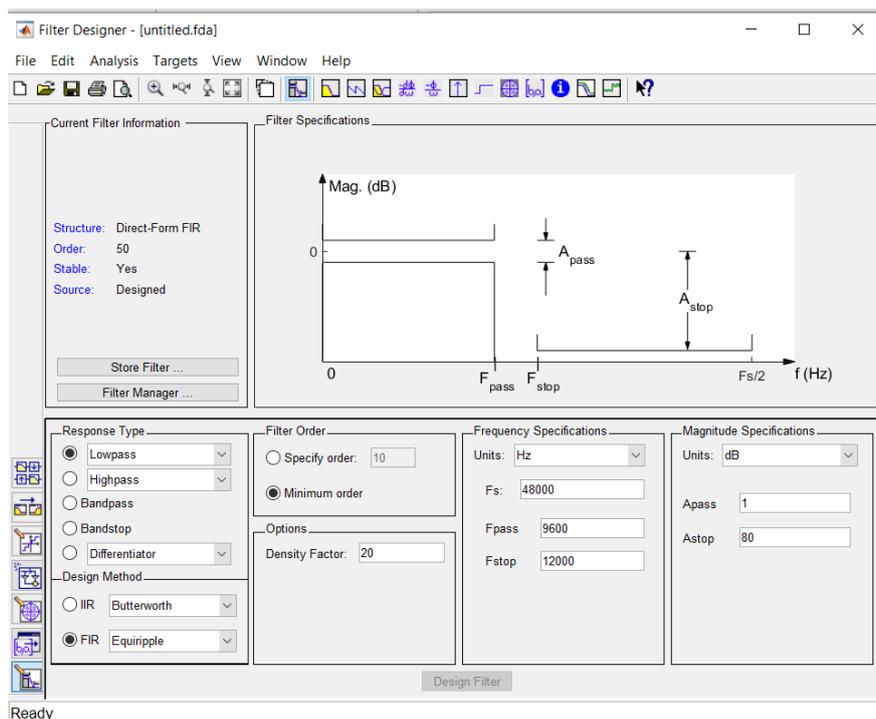


Рисунок 7.3 – Окно программы

На рисунке 7.4 показан вид окна при выборе проектирования полосового фильтра. В окне просмотра представлены зоны допусков АЧХ с указанием их названий. После задания типа фильтра и его параметров достаточно нажать кнопку **Design Filter** для того, чтобы запустить программное конструирование фильтра под заданные параметры. После этого, используя кнопки панели инструментов, можно посмотреть и, если надо, скорректировать полученные характеристики фильтра. На рисунке 7.5 представлен результат выполнения программы.

Важным достоинством проектировщика фильтров является возможность реализации разработанных в нем фильтров в пакете Simulink. Спроектированный в программе `fdatool` фильтр может быть перенесен в графическую среду Simulink нажатием на кнопку **Realize Model**. На экране появится Simulink-модель, включающая один блок под именем Filter. Состав блока (в данном случае это структура разработанного фильтра) может быть выведен на экран двойным щелчком мыши. На рисунке 7.6 представлено одно из звеньев фильтра, построенного согласно данным рисунка 7.4.

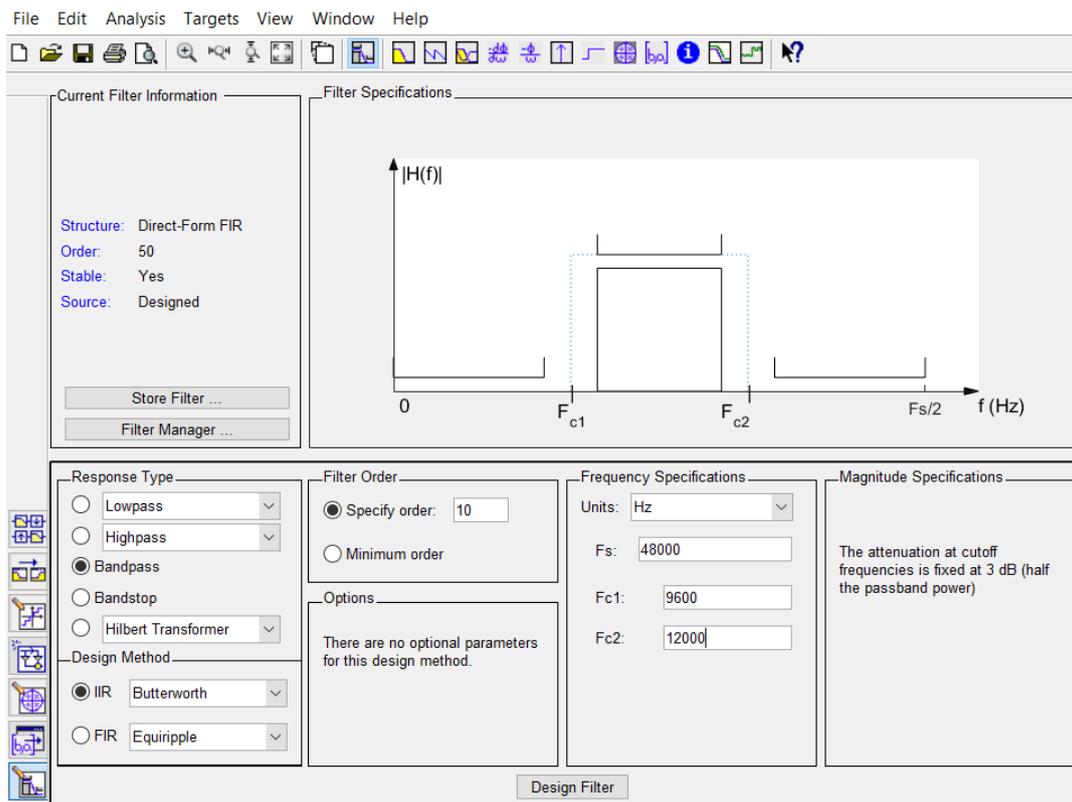


Рисунок 7.4 – Заданные параметры фильтра

- импортрование входного сигнала в SPTool;
- визуализацию входного и выходного сигналов;
- моделирование процесса фильтрации;
- расчет и визуализацию спектров входного и выходного сигналов;
- выход из программы SPTool.

Синтез цифрового фильтра. После обращения к программе SPTool (с помощью вызова `sptool`) в командном окне Matlab открывается первое окно SPTool: `startup.spt` с тремя списками: **Signals** (сигналы), **Filters** (Фильтры), **Spectra** (Спектры).

Под списком **Filters** размещаются 4 кнопки: **View** (Вид) – просмотр характеристик фильтра; **New** (Новый проект) – синтез нового фильтра; **Edit** (Редактирование проекта) – изменение требований к фильтру и его синтез без изменения имени фильтра; **Apply** (Применить) – моделирование процесса фильтрации сигнала, имя которого выделено в списке **Signals**, фильтром, имя которого выделено в списке **Filters**.

В списке **Filters** содержатся имена синтезированных ранее и сохраненных фильтров; если они отсутствуют, активна только кнопка **New**. Терминология «сохраненный фильтр» означает, что в файле указанным именем сохранены все данные о синтезированном фильтре.

Для синтеза нового ЦФ необходимо нажать кнопку **New**, после чего открывается второе окно **Filter** (Синтез фильтра), в котором выполняются следующие действия.

1 Задаются требования к синтезируемому ЦФ:

- в поле ввода **Frequency Specifications** (Частота дискретизации) – частота дискретизации в герцах (**Fpass** – граничная частота полосы пропускания в герцах, **Fstop** – граничная частота полосы задерживания в герцах), для фильтров ПФ и РФ их будет несколько;

- в группе **ResponseType** (Параметры) – тип избирательности фильтра (**Lowpass** – Фильтр нижних частот, **Highpass** – Фильтр высоких частот, **Bandpass** – Полосовой фильтр, **Bandstop** – РФ (Режекторный фильтр));

- в раскрывающемся списке **Design Method** (Алгоритм) – тип ЦФ (КИХ или БИХ) и одновременно метод синтеза.

Для синтеза КИХ-фильтров может быть выбран один из следующих методов:

- а) **Equiripple FIR** – оптимальной фильтрации Чебышева;
- б) **LeastSquare FIR** – наименьших квадратов;
- в) **Window FIR** – окон Кайзера.

При синтезе БИХ-фильтров используется метод билинейного Z-преобразования со следующими типами аппроксимации:

- а) **Butterworth IIR** – Баттерворта;
- б) **Chebyshev Type I IIR** – Чебышева I рода;
- в) **Chebyshev Type 2 IIR** – Чебышева II рода;
- г) **Elliptic IIR** – Золотарева – Кауэра;

– в группе **Magnitude Specifications** – требования к максимально допустимому отклонению (**Dpass** – максимально допустимое отклонение; **Dstop** – минимально допустимое отклонение).

2 Синтезируется ЦФ по введенным требованиям после нажатия кнопки **DesignFilter**.

3 Выводятся следующие данные о синтезируемом фильтре.

– в поле **FrequencyResponse** (Частотная характеристика) – график характеристики ослабления.

Анализ характеристик синтезированного фильтра. Для анализа характеристик синтезированного фильтра необходимо выполнить следующие действия.

1 В списке **Filters** окна SPTool: startup.spt выделить имя фильтра.

2 Нажать кнопку **View**, в результате чего открывается третье окно **Filter Viewer** (Просмотр фильтра) и приводятся данные о синтезированном фильтре: в группе Analysis возможно просмотреть:

- **Magnitude Response**(АЧХ);
- **Phase Response** (ФЧХ);
- **Group Delay Response** (ГВЗ);
- **Zeros and Poles** (Нули и полюсы) – карта нулей и полюсов;
- **Impulse Response** (Импульсная характеристика);
- **Step Response** (Переходная характеристика).

Для вывода графиков необходимо установить соответствующие флажки.

Создание входного сигнала. Источником сигнала для SPTool может являться рабочее пространство памяти Workspace, если сигнал создается непосредственно в командном окне Matlab. Также входной сигнал можно импортировать из приложения Simulink.

Как осуществляется процесс импорта сигнала и его визуализация, расчет спектра сигнала было рассмотрено в лабораторных работах № 2 и 3.

Моделирование процесса фильтрации. После синтеза фильтра и импортирования сигнала можно моделировать процесс фильтрации. Для этого необходимо:

- 1) в группе Signals окна SPTool:startup.spt выделить имя сигнала;
- 2) в группе Filters окна SPTool:startup.spt выделить имя фильтра;
- 3) нажать кнопку Apply, после чего появляется седьмое окно ApplyFilter с именами:

- входного сигнала;
- фильтра;
- выходного сигнала, если имя выходного сигнала изменять не нужно,

нажать кнопку ОК (в противном случае сначала изменить имя); после этого происходит автоматический возврат в окно SPTool:startup.spt.

В поле Signals окна SPTool: startup.spt можно выделить одновременно входной и выходной сигналы (удерживая клавишу <Ctrl>) и, нажав кнопку View, в окне Signal Browser по очереди просмотреть файлы, указывая в группе Select Trace их имена.

7.2 Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомиться с основными методами, применяемыми при проектировании цифровых фильтров.
- 2 Составить программный код и синтезировать фильтры по заданию преподавателя.
- 3 Используя программу fdatool, по заданию преподавателя спроектировать цифровой фильтр. Привести его схему в программе Simulink.
- 4 По заданию преподавателя спроектировать цифровые фильтры с различными характеристиками.

7.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: цель работы, схемы моделирования, результаты моделирования в среде Matlab, выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое фильтрация?
- 2 Что представляет собой цифровой фильтр? Чем описывается работа цифрового фильтра?
- 3 Как классифицируются цифровые фильтры? Поясните их структуру.
- 4 Назовите основные характеристики цифровых фильтров.
- 5 В какой последовательности проводится проектирование работы цифрового фильтра?
- 6 Какие функции могут использоваться при проектировании цифровых фильтров в среде Matlab?
- 7 Какие программы можно использовать для проектирования цифровых фильтров?

8 Изучение специализированных компьютерных программ для регистрации и обработки изображений в неразрушающем контроле

Цель работы: изучение специализированных компьютерных программ для регистрации и обработки изображений в неразрушающем контроле.

8.1 Основные теоретические положения

Интерес к методам цифровой обработки изображений произрастает из двух основных областей ее применения, которыми являются повышение качества изображений для улучшения его визуального восприятия человеком и обработка изображений для их хранения, передачи и представления в автономных системах машинного зрения.

Изображение можно определить как двумерную функцию $f(x, y)$, где x и y – координаты в *пространстве* (конкретно, на плоскости), и значение f которой в любой точке, задаваемой парой координат (x, y) , называется *интенсивностью* или *уровнем серого* изображения в этой точке. Если величины x , y и f принимают конечное число дискретных значений, то говорят о *цифровом изображении*. *Цифровой обработкой изображений* называется обработка цифровых изображений с помощью цифровых вычислительных машин (компьютеров) [3].

В практике неразрушающего контроля для регистрации и обработки изображений чаще всего используются компьютерные программы, которые входят в программное обеспечение средств контроля. Чаще всего такие программы используются при ультразвуковом, тепловом и радиационном контроле.

1 *Программы для обработки изображений при тепловом контроле*. Программа **IRPREVIEW** является неотъемлемой частью ИК-системы ИРТИС и предназначена для обеспечения визуализации измерения тепловых полей, а также для хранения и обработки полученных термограмм в формате *.DTV в среде WINDOWS. Данная программа позволяет не только получать тепловые изображения различных объектов, но и производить обработку полученных термограмм.

Программа позволяет проводить настройку контрастности изображения, выбирать палитру, добавлять изотерму на термограмму, для большей информативности изображения, расставлять температурные точки, для определения точной температуры, проводить расстановку температурных зон. Для более детального изучения термограммы в программе предусмотрена функция цифрового зума. Также данная программа позволяет проводить построение термопрофиля, временных графиков и гистограмм.

Testo IRSoft – профессиональное программное обеспечение для анализа термограмм. Эта программа позволяет проводить установку точек измерения, создавать гистограммы процентного соотношения температур на заданной области снимка и температурного профиля (для отображения на графике распределения температур), важных для последующей обработки параметров тепловизионного снимка (коэффициента излучения, температуры окружающей среды, отраженной температуры и т. д.).

Программное обеспечение ThermaCAM Researcher специально разработано для исследований и разработок, для научных работников и всех других пользователей инфракрасной техники, которые хотят проводить детализированный анализ статических явлений или анализ в реальном времени тепловых процессов.

Программа Researcher обеспечивает сохранение, вызов из памяти и анализ ИК-изображений и данных, поступающих непосредственно от ИК-камеры, что позволяет проводить углубленную и точную оценку тепловых параметров. Функции углубленного теплового анализа Программа ThermaCAM Researcher имеет мощные функции измерения и анализа для быстрого и углубленного температурного анализа, включая функции построения изотерм и измерений в

точках, построения линейных профилей, гистограмм для отдельных участков, функцию вычитания изображений и многое другое.

2 Программы для анализа рентгеновских изображений. Программное обеспечение «ВидеоРен Про» позволяет проводить инвертирование изображения; геометрические преобразования изображения: масштабирование, вращение, зеркальное отображение, вырезание фрагмента; нанесение маркеров (знаки, текст) на изображение; настраивать оптимальную яркость и контраст изображения по гистограмме оптической плотности всего изображения или зоны интереса. Наличие фильтров для обработки изображений позволяет улучшить видимость изображений в целом или его отдельных фрагментов, облегчая выявление дефектов, а также с помощью настройки возможна адаптация данных фильтров для любого объекта контроля. Кроме того, с помощью данной программы можно проводить измерение размеров выявленных дефектов и автоматизированный контроль.

На рынке программных продуктов для обработки рентгеновских снимков представлено также программное обеспечение **УНИРЕН**, которое предназначено для оцифровки изображений на рентгеновских пленках; цифровой обработки изображений для улучшения видимости; анализа (расшифровки) цифровых радиографических изображений; измерения линейных размеров и оптической плотности; документирования результатов анализа; архивирования изображений в электронной базе и/или оптических дисках; поиска необходимого снимка в архиве.

3 Программы для анализа изображений при ультразвуковом контроле. Программное обеспечение для анализа изображений при ультразвуковом контроле обычно поставляется с приборами для контроля.

Например, программное обеспечение UltraVision 3 позволяет моделировать детали как с простой, так и со сложной геометрией. UltraVision 3 содержит большой выбор заранее заданных форм объектов, включая трубы, угловые, тавровые, стыковые сварные соединения. В распоряжении пользователя есть инструмент, с помощью которого можно создавать детали произвольной геометрической формы. В базе программного обеспечения заведены разнообразные разделки кромок: V , X , U и т. д. Кроме этого, данное программное обеспечение позволяет проводить объёмную обработку данных, используя инструменты типа: слияние нескольких типов данных, сглаживание, аппроксимирование, создание C -скана; обработка данных метода контроля TOFD: имеются средства для коррекции гистерезиса (синхронизация для продольной волны). Также в программе имеется возможность построения 3D-графиков.

Программное обеспечение для обработки изображений фирмы позволяет пользователю проводить обработку изображений, полученных при реализации методов фазированной решетки и TOFD.

8.2 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с современным программным обеспечением для обработки изображений при неразрушающем контроле.

2 Провести обработку заданных преподавателем изображений в одной из программ.

8.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: цель работы, краткое описание используемого программного обеспечения, результаты обработки полученного изображения.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое цифровое изображение?
- 2 Как математически представить цифровое изображение?
- 3 Какие программы используются для анализа изображений при тепловом контроле?
- 4 Какие функциональные возможности данных программ?
- 5 Какие программы могут использоваться для обработки изображений при радиационном контроле?
- 6 Какие программы могут использоваться для обработки изображений при ультразвуковом контроле?

9 Анализ цифровых изображений, отражающих результаты неразрушающего контроля объектов. Термограммы. Рентгенограммы

Цель работы: проведение анализа изображения, отражающего результаты теплового и радиационного неразрушающего контроля.

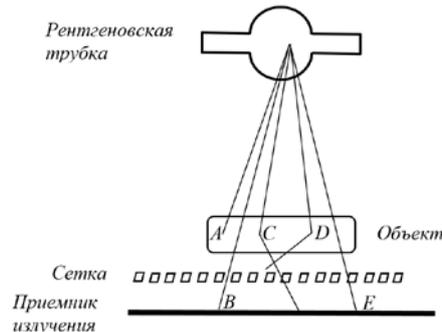
9.1 Основные теоретические сведения

Тепловое изображение или термограмма позволяет визуально быстро и эффективно обнаружить любые нарушения или технические утечки [7, 8].

Методы получения термоизображений различаются по способу регистрации излучения, исходящего от поверхности объекта. Стандартные устройства для измерения температуры состоят из системы регистрации излучения в строго определенной области поля зрения и детектора, который преобразует сфокусированное на него излучение в электрический сигнал. Формирование термоизображения осуществляется с помощью оптической сканирующей системы (или пироэлектрического телевизионного видикона) и монитора, работающего совместно с устройством обработки изображения. Тепловые приемники, такие как термопары или полупроводниковые болометры, которые реагируют на повышение температуры чувствительного элемента, имеют меньшую чувствительность и большую постоянную времени по сравнению с фотоэлектрическими приемниками. Последние способны зарегистрировать любые изменения потока излучения за время порядка нескольких микросекунд, однако регистрируют лишь малую часть общего потока, исходящего от поверхности тела. Измерение температуры поверхности тела с помощью ИК-излучения требует знания излучательной способности исследуемой поверхности во всем спектральном диапазоне чувствительности приемника.

Программы для обработки термограмм были рассмотрены в лабораторной работе № 8.

Рентгенографическое изображение формируется в результате взаимодействия квантов рентгеновского излучения с приемником и представляет собой распределение квантов, которые прошли через объект контроля и были зарегистрированы детектором. Последние делятся на первичные (т. е. прошедшие через тело пациента без взаимодействия с тканями тела) и на вторичные кванты, образующиеся в результате взаимодействия с материалом объекта контроля (рисунок 9.1).



B, E – кванты, которые прошли через объект без взаимодействия; C, D – рассеянные кванты. Квант D отсеивается сеткой, препятствующей рассеянному излучению, а квант A поглощается объектом

Рисунок 9.1 – Компоненты системы для получения рентгеновских изображений

Вторичные кванты, как правило, отклоняются от направления своего первоначального движения и несут мало полезной информации. Полезную информацию несут первичные кванты. Они дают информацию о вероятности того, что квант проходит через объект контроля без взаимодействия. Вероятность этого события будет зависеть от совокупности ослаблений во всем материале, лежащем на направлении распространения рентгеновских лучей. Поэтому получаемое изображение является *проекцией* характеристики ослабления во всем материале, лежащем на направлении распространения рентгеновского излучения. Точнее говоря, изображение представляет собой двумерную проекцию трехмерного распределения ослабления рентгеновских лучей в объекте.

Двумерное сечение трехмерного распределения плотности тканей можно получить, применяя метод классической или компьютерной томографии.

9.2 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с принципами построения изображения при тепловом неразрушающем контроле.

2 По заданию преподавателя провести обработку изображения, полученного при тепловом контроле

3 Ознакомиться с принципами формирования изображения при рентгеновском контроле.

4 Провести по заданию преподавателя анализ рентгенограмм.

9.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: цель работы, термограмму до проведения обработки в специализированной программе, термограмму после обработки, рентгенограммы до и после обработки, выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как происходит формирование изображения при тепловом контроле?
- 2 Какие функции программы используются при обработке изображения?
- 3 Как увеличить контрастность изображения?
- 4 Как учитывается коэффициент теплопроводности при обработке изображения?
- 5 Можно ли в программе редактировать видеоматериалы?
- 6 Поясните основные принципы построения рентгеновского изображения.
- 7 Какие характеристики изображения можно улучшать?
- 8 Как определяются размеры дефектов по рентгенограмме?
- 9 Как увеличить контрастность изображения?

10 Анализ цифровых изображений, отражающих результаты неразрушающего контроля объектов. Эхограммы

Цель работы: проведение анализа изображения, отражающего результаты ультразвукового неразрушающего контроля.

10.1 Основные теоретические сведения

При ультразвуковом неразрушающем контроле применяются следующие виды разверток: *A*-развертка, *B*-развертка, *S*-скан, *C*-развертка и *D*-развертка [9, 10].

Развертка типа *A* – это представление сигналов в координатной плоскости «амплитуда сигнала – время распространения ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии (КИ)» в конкретной точке нахождения ПЭП (рисунок 10.1): « U , дБ – t , мкс».

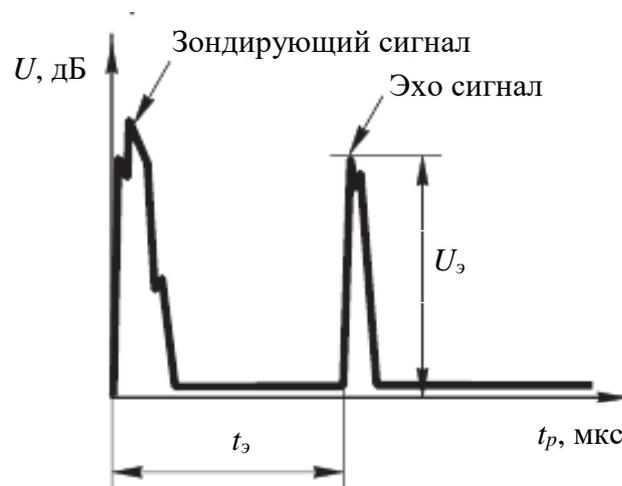


Рисунок 10.1 – Представление сигнала ультразвукового контроля на развертке типа *A*

Данный вид развертки получил свое название от слова *Amplitude* («амплитуда») по причине того, что на *A*-развертке принятые эхо-сигналы отображаются в виде импульсов, имеющих определенную форму, длительность и амплитуду.

Горизонтальная развертка типа *A* синхронизирована с временем распространения ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии. На *A*-развертке в каждой точке расположения ПЭП эхо-сигнал от дефекта отображается в виде импульса, временное положение которого относительно зондирующего импульса пропорционально расстоянию до дефекта.

Развертка типа *B* – это представление сигналов в координатной плоскости «время распространения ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии – время движения ПЭП по изделию»: « t , мкс – $t_{ПЭП}$, см».

Ультразвуковые дефектоскопы, индицирующие результаты контроля в виде развертки типа *B*, оснащены, как правило, датчиками пути, позволяющими производить привязку принятых сигналов не ко времени от момента начала движения, а непосредственно к координате перемещения ПЭП ($X_{ПЭП}$). В этом случае сигналы от дефектов и других несплошностей отображаются на развертке типа *B* в координатах « t , мкс – $X_{ПЭП}$, мм».

Данный вид развертки получил свое название от английского слова *Bright* («яркость») по причине того, что сигналы на развертке типа *B* отображаются в виде яркостных отметок.

На развертке типа *B* фиксируются не все сигналы, принятые дефектоскопом, а только те, амплитуда которых превышает пороговый уровень дефектоскопа.

Принцип представления сигналов на развертке типа *B* проиллюстрирован на рисунке 10.2 на примере одного эхо-сигнала от дефекта.

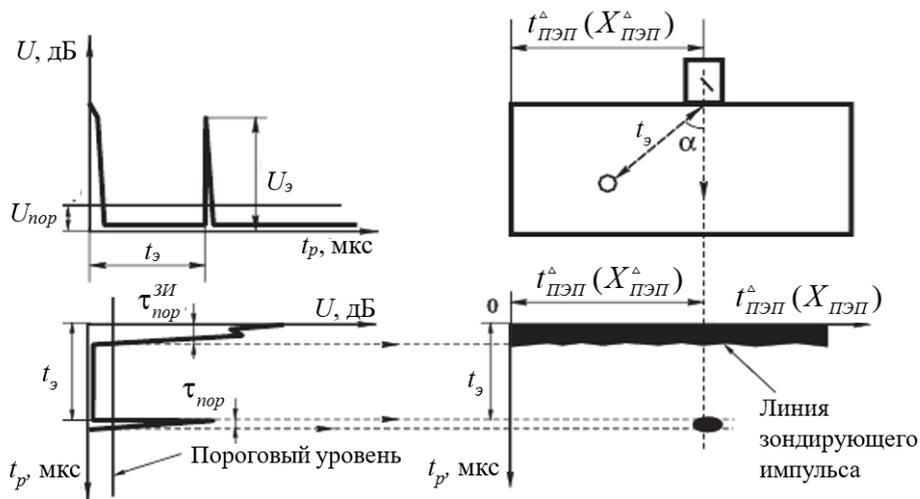


Рисунок 10.2 – Принципы представления сигнала в виде развертки *B*

Видно, что для отображения сигнала на развертке типа *B* ее координатные оси (« t , мкс – $t_{ПЭП}$, ($X_{ПЭП}$), мм») расположены непосредственно под контролируемым изделием. Координатная плоскость же развертки типа *A* ориентирована таким образом, чтобы ось времени задержки сигнала t_p была бы параллельна оси t_p координат развертки типа *B*.

Далее отображение эхо-сигнала в координатах развертки типа B производится в следующем порядке:

- по горизонтальной оси откладывается время движения (координата перемещения) ПЭП в данный момент времени при озвучивании дефекта (или отражателя);
- по вертикальной оси t_p откладывается время задержки сигнала t_3 ;
- на развертке типа B отображается точка с координатами $t_{ПЭП}(t_p)$ или $X_{ПЭП}(t_p)$, представляющая собой эхо-сигнал.

Строго говоря, представленный выше эхо-сигнал пересекает пороговый уровень дефектоскопа не в одной точке, а в пределах отрезка, равного длительности рассматриваемого сигнала на пороговом уровне. Вместе с этим, как отмечено выше, на развертке типа B в виде яркостных отметок отображаются все сигналы, которые превышают пороговый уровень дефектоскопа.

S -скан является графическим отображением прохождения пучка ультразвукового импульса через объект контроля. Это вид сверху (рисунок 10.3).

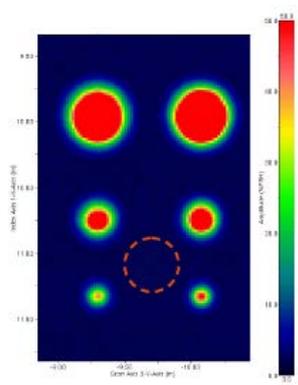


Рисунок 10.3 – S -скан

Секторное сканирование (S -скан, азимутальное, или угловое сканирование). Используя одну и ту же группу активных элементов, луч последовательно направляется под различными углами в заданном диапазоне с заданным шагом, при этом поддерживается заданное фокусное расстояние или фокусная глубина. Величина сектора сканирования зависит от типа волны, характеристик решетки и присоединенной призмы. Вид S -скан представлен на рисунке 10.4.

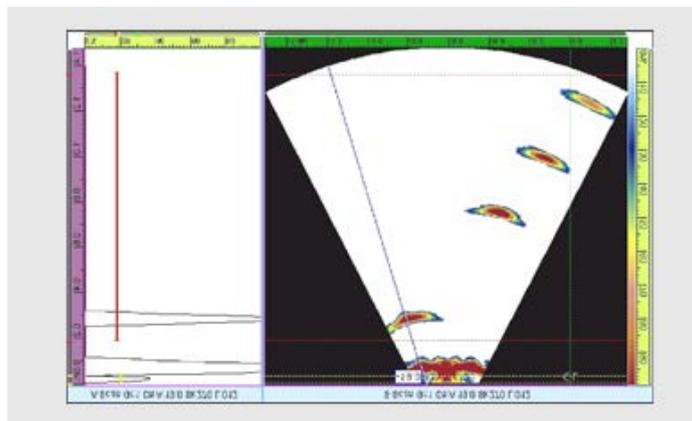


Рисунок 10.4 – S -скан

10.2 Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться с основными принципами формирования различных видов разверток при ультразвуковом неразрушающем контроле.

2 По заданию преподавателя провести обработку различных видов изображений, полученных при контроле объектов.

10.3 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее: цель работы, изображение до обработки и после обработки.

Контрольные вопросы

1 Какие виды разверток используются при ультразвуковом неразрушающем контроле?

2 Поясните принцип формирования *A*-развертки.

3 Поясните принцип формирования *C*-скана.

4 Поясните принцип формирования *S*-скана.

5 Как формируется изображение при TOFD-методе?

6 Какие параметры изображения можно улучшить при помощи специализированных программ?

Список литературы

1 **Дьяконов, В. П.** MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

2 **Нефёдов, С. В.** Преобразование измерительных сигналов: учебник / С. В. Нефёдов, А. П. Тарасенко, В. М. Чернова. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2018. – 224 с.

3 **Гадзиковский, В. И.** Цифровая обработка сигналов: практическое пособие / В. И. Гадзиковский. – Москва: СОЛОН-Пр., 2014. – 766 с.

4 **Шахтарин, Б. И.** Обнаружение сигналов: учебное пособие для вузов / Б. И. Шахтарин. – 3-е изд., стер. – Москва: Гор. линия-Телеком, 2015. – 464 с.

5 **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цели и сигналы / С. И. Баскаков. – 4-е изд. – Москва: Высшая школа, 2003. – 462 с.

6 **Солонина, А. И.** Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций: учебное пособие / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, С. М. Арбузов. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.

7 Физика визуализации изображений в медицине: в 2 т. / Под ред. С. Уэбба. – Москва: Мир, 1991.

8 **Вавилов, В. П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – Москва: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

9 Сайт компании Olympus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com>. – Дата доступа: 25.11.2022.

10 Сайт «TOFD и фазированные решетки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tofd-ra.ru>. – Дата доступа: 25.11.2022.