Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы №1 по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения»

Воронеж 2021

Составитель:

д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В

Цифровая обработка сигналов: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Р.В. Кузьменко. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. _____.

Основной целью указаний является выработка навыков цифровой обработки сигналов и средств их компьютерного моделирования в системе MATLAB.

Предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов 4 курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Методичка ЦОС 2021.doc

Библиогр.: 1 назв.

УДК

621.391.083.92

ББК 32.811.3

Рецензент

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

Лабораторная работа №1 Знакомство с MATLAB.

1. Основные объекты языка МАТLАВ

Цель работы: познакомиться с назначением и интерфейсом системы MATLAB и овладеть начальными навыками работы в режиме прямых вычислений.

Краткая теоретическая справка

Система MATLAB — это интерактивная система, предназначенная для компьютерного моделирования практически в любой области науки и техники.

Интерфейс MATLAB образуют следующие окна.

Command Window (Командное окно) — основное окно интерактивной системы MATLAB с активизированной командной строкой.

Из активизированной командной строки пользователь может возвращаться к предыдущим строкам с помощью клавиш <↑> и <↓>.

Сеанс работы в окне Command Window до выхода из МАТLАВ называют текущей сессией.

Current Folder (Текущая папка) — в этом окне выводится содержимое папки, имя которой отображается в раскрывающемся списке **Current Folder** на панели инструментов окна MATLAB.

В составе ранних версий МАТLAВ (до 2009 г.) содержалась автоматически создаваемая текущая папка со стандартным именем¹ work, предназначенная для хранения файлов и папок, создаваемых пользователем. В последующих версиях такая папка отсутствует. Для тех же целей предусмотрена папка MATLAB, автоматически создаваемая в папке **Мои документы** на рабочем столе.

Создание собственной папки в окне Current Folder выполняется с помощью контекстного меню по команде New Folder (Новая папка), и новой папке присваивается имя.

Сохранение пути к собственной папке в окне Current Folder выполняется по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders (Добавить к пути | Выделенные папки).

Workspace (Рабочая область памяти) — в этом окне выводится список текущих переменных, сохраняемых в рабочей области памяти Workspace до выхода из MATLAB.

Command History (История команд) — в этом окне выводится построчный список объектов языка MATLAB, вводимых в ходе текущей и предшествующих сессий. Двойным щелчком левой кнопки мыши можно дублировать любую строку из окна Command History в окно Command Window.

¹ Здесь и далее во избежание путаницы для папок и файлов MATLAB используется шрифт Courier New.

Пользователь может произвольно менять состав активных окон с помощью команд меню **Desktop** (Стол).

Система оперативной помощи MATLAB включает в себя:

справочную систему в формате HTML (HyperText Markup Language — язык гипертекстовой разметки), обращение к которой производится по команде **Product Help** (Помощь по продукту) в меню **Help** окна **MATLAB**; команду:

help <стандартное имя объекта языка MATLAB>

Режим прямых вычислений

Режим прямых вычислений (называемый также командным режимом) означает, что вычисления выполняются без составления программы. Объекты языка MATLAB в ходе текущей сессии вводятся построчно в командной строке окна Command Window с соблюдением следующих правил:

символ ";" (точка с запятой) в конце строки блокирует автоматический вывод результата;

символ "..." (многоточие) в конце строки является признаком продолжения предыдущей строки;

символ "%" (процент) в начале строки соответствует комментарию.

Базовые объекты языка МАТLAВ

К базовым объектам языка MATLAB относятся:

- команды;
- операторы;
- константы;
- переменные;
- функции;
- выражения.

Команда — это объект языка МАТLAВ со стандартным именем, предназначенный для взаимодействия с системой МАТLAВ и имеющий формат:

<команда><содержательная часть>

где <команда> — стандартное имя команды; <содержательная часть> — уточняется для каждой конкретной команды и может отсутствовать.

В конце команды символ ";" не ставится.

Список команд общего назначения выводится по команде:

help general

Наиболее распространенные команды приведены в табл. 1.1. Другие будут рассматриваться по мере изложения материала.

Таблица 1.1. Команды

Ко манла	Назначение	
clc	Очистка окна Command Window	
cle	Удаление объектов из Workspace (без	
ar	содержательной части — очистка Workspace)	

	for	Установка формата вывода данных (см. табл.	
mat		1.2)	
	hel	Справка по стандартному объекту MATLAB	
р			
	loa	Загрузка файла с диска в Workspace (см. разд.	
d		1.1.4)	
	sav	Сохранение на диске объекта Workspace (см.	
e		разд. 1.1.4)	
	ver	Вывод информации об установленной версии	
		MATLAB и пакетах расширения	
	wh	Вывод содержимого папки (без содержательной	
at		части — текущей папки), например:	
		what work\LAB\lab_01	
	wh	Вывод пути для нахождения встроенной или	
ich		внешней функции	
	wh	Вывод содержимого Workspace	
0		• •	
	wh	Вывод содержимого Workspace с	
OS		дополнительными сведениями	

Оператор — это объект языка MATLAB со стандартным именем, предназначенный для разработки программ.

Простейшим оператором является оператор присваивания с форматом:

<имя переменной> = <выражение>

ИЛИ

<выражение>

В последнем случае значение выраженияприсваивается переменной со стандартным именем ans.

Константа — это объект языка МАТLAB, имеющий в процессе вычислений неизменное значение.

Различают следующие типы констант:

численные, среди которых выделяют:

- целые;
- вещественные;
- комплексные;

логические;

символьные.

Целые и вещественные константы могут вводиться в обычной форме с разделением точкой целой и дробной частей:

>> 158; >> -17.38; или в форме Е, которой соответствует представление числа в показательной форме:

 $\mu \cdot 10^p, \qquad (1.1)$

где µ — мантисса — вещественная константа; р — порядок — целая константа; 10 — основание, обозначаемое буквой е:

```
>> 0.157e-3;
```

>> 12.23e8;

Комплексные константы вводятся в алгебраической форме:

 $\xi + j\eta.$ (1.2)

Мнимая единица вводится как і или j, но выводится всегда как i: >> 5+3.7j

ans =

```
5.0000 + 3.7000i
```

Возможен ввод с использованием символа умножения в мнимой части: >> 5+3.7*j

ans =

```
5.0000 + 3.7000i
```

Вещественная и/или мнимая части комплексного числа могут вводиться в форме Е:

>> 5e-3+3.7e5j

ans =

5.0000e-003 +3.7000e+005i

Комплексно сопряженная константа вводится с помощью символа "" (апостроф):

>> (5+3i)'

ans =

5.0000 — 3.0000i

Вывод численных констант может производиться по умолчанию или в заданном формате с помощью команды:

format <вид формата>

где содержательная часть может отсутствовать.

Действие команды format сохраняется до ее отмены другой командой format.

Разновидности форматов можно вывести по команде:

help format

Наиболее распространенные форматы приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Форматы для вывода констант

Команд	Формат вывода	
a		
format	Формат, тождественный формату format short	
format	Формат с автоматическим выводом в	
short	обычной форме или нормализованной форме Е	
	с 4-мя значащими цифрами в дробной части	
	мантиссы.	

	Этот формат установлен по умолчанию
format short e	Короткий формат Е с выводом в нормализованной форме Е с 4-мя значащими цифрами в дробной части мантиссы
format long	Длинный формат с автоматическим выводом в обычной форме или нормализованной форме Е с 15-ю значащими цифрами в дробной части мантиссы
format long e	Длинный формат с выводом в нормализованной форме Е с 15-ю значащими цифрами в дробной части мантиссы

Форму Е называют *нормализованной* (см. табл. 1.2), если целая часть мантиссы µ в (1.1) содержит одну отличную от нуля значащую цифру, а порядок р — три цифры.

Стандартные константы — это константы со стандартными именами. Их полный список может быть выведен по команде: help elmat

Наиболее распространенные стандартные константы приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Стандартные константы

Станда ртное имя константы	Назначение
і или ј	Мнимая единица, : соответствующая $\sqrt{-1}$: i = sqrt(-1)
pi	Число π

Таблица 1.3 (окончание)

Станда ртное имя константы		Назначение
inf)	Inf (или	Машинная бесконечность (число, большее максимально допустимого во внутренних вычислениях в MATLAB)
	Nan	Нечисло (Not-a-number). Присваивается неопределенностям типа 0/0, inf/inf, 0·inf

Логические константы — это константы, принимающие значения 1 (true — истина) или 0 (false — ложь).

Символьные константы — это любые последовательности символов, заключенные в апострофы:

>> 'Sella'

ans =

Sella

Переменная — это объект языка МАТLAB, который в процессе вычислений может менять свое значение.

Различают следующие типы переменных:

• простые переменне;

• массивы.

Переменные представляются своими именами (идентификаторами).

Имя переменной составляется из последовательности латинских букв, цифр и символа подчеркивания и начинается с буквы. В MATLAB *прописные и строчные буквы различаются*.

Массивом называют упорядоченную совокупность данных, объединенных одним именем.

Массив характеризуется:

Празмерностью. Размерность массива равна количеству индексов k, которые указывают на упорядоченность данных в k-мерном пространстве.

Если данные упорядочены в строку (столбец), то их порядок следования указывается с помощью одного индекса, и массив называют одномерным или *вектором*.

Если данные упорядочены одновременно по строкам и по столбцам, то их порядок следования указывается с помощью двух индексов, и массив называют двумерным или *матрицей*.

Если данные упорядочены по матрицам, то их порядок следования указывается с помощью третьего индекса, и массив называют и т. д.;

Произведением числа элементов по каждому индексу, а именно: 1×n — одномерный массив (вектор-строка); m×n — двумерный и т. д.

Матрицу называют квадратной порядка n, если число строк равно числу столбцов: m = n;

Smunom. Тип массива определяется типом его элементов. Элементами числового массива являются численные константы. Основные типы массивов рассматриваются в гл. 3.

Особенностью MATLAB является то, что тип переменной не объявляется, и любая переменная по умолчанию считается матрицей¹.

В MATLAВ нижняя граница индексов массива равна единице.

¹ Отсюда и название MATLAB — MATrix LABoratory (Матричная лаборатория).

Матрица вводится построчно в квадратных скобках, элементы строки отделяются пробелом или запятой, а строки — точкой с запятой:

>> A = $\begin{bmatrix} 1 \ 2 \ 3;5 \ 6 \ 7;8 \ 9 \ 7 \end{bmatrix}$ A = $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 7 \end{bmatrix}$

Вектор (вектор-строка) размером 1×п вводится в квадратных скобках, а его элементы — через пробел или запятую:

>> A = [1 4 5 7 8] A =1 4 5 7 8

Вектор-столбец размером т×1 вводится в квадратных скобках, а его элементы — через точку с запятой:

>> A = [1;4;5] A = 1 45

Скаляр размером 1×1 можно вводить без квадратных скобок: >> b = 1.5e-3;

Простой переменной, таким образом, соответствует скаляр.

Функции в MATLAB представлены двумя разновидностями:

%встроенные;

*S*внешние.

Встроенная функция (по умолчанию функция) — это объект языка MATLAB со стандартным именем, предназначенный для выполнения действий с параметрами (аргументами), перечисленными через запятую и заключенными в круглые скобки.

Список основных элементарных математических функций, сгруппированных по назначению, представлен в табл. 1.4. Их полный список выводится по команде:

help elfun

Тип функции	Функция	Назначение
Тригонометри-	sin(X)	Синус — sin(x)
ческая	cos(X)	Косинус — cos(x)
	tan(X)	Тангенс — tg(x)
	cot(X)	Котангенс — ctg(x)
Обратная	asin(X)	Арксинус — arcsin(x)

Таблица 1.4. Элементарные математические функции

1		
тригонометрическая	acos(X)	Арккосинус — arccos(x)
	atan(X)	Арктангенс — arctg(x)
	acot(X)	Арккотангенс — arcctg(x)
Экспоненциальная	exp(X)	Экспонента — е ^х
	pow2(X)	Возведение двойки в степень — 2 ^x
	nextpow2(X)	Ближайшая степень двойки в сторону увеличения — $int[log_2(x)]$
Логарифмическая	log(X)	Натуральный логарифм — ln(x)
	log10(X)	Десятичный логарифм — lg(x)
	log2(X)	Логарифм по основанию $2 - \log_2 x$
Корень квадратный	sqrt(X)	Корень квадратный \sqrt{x}
Число по модулю m	mod(X,m)	Число х по модулю m — mod _m x
С комплексным	abs(X)	Модуль числа x
аргументом	angle(X)	Аргумент числа х
	complex(X1,X2)	Запись комплексного числа по вещественной X1 и мнимой X2 частям
	real(X)	Выделение вещественной части — Re(x)
	imag(X)	Выделение мнимой части — Im(x)
	conj(X)	Комплексно сопряженное число

Таблица 1.4 (окончание)

Тип Функция Назначени функции	Ie
----------------------------------	----

Округление	fix(X)	Округление в направлении нуля — усечение дробной части
	floor(X)	Округление в направлении – _∞ — округление до ближайшего целого в сторону уменьшения
	ceil(X)	Округление в направлении +∞ — округление до ближайшего целого в сторону увеличения
	round(X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону увеличения модуля числа
	nearest(X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону увеличения
	convergent(X)	Округление до ближайшего целого — при дробной части, равной 0.5, — в сторону ближайшего четного числа

Список основных функций преобразования систем счисления представлен в табл. 1.5. Цифра 2 в имени этих функций соответствует английскому предлогу "to", переводимому как "в" или "к".

Таблица 1.5. Функции преобразования систем счисления

Фун кция	Назначение	
dec2	Преобразование десятичного целого в	
hex(X)	шестнадцатеричное.	
	Десятичное число указывается в качестве	
	аргумента, а шестнадцатеричное выводится без	
	апострофов с использованием заглавных букв	
dec2	Преобразование десятичного целого в	
bin(X)	двоичное.	
	Десятичное число указывается в качестве	
	аргумента, а двоичное выводится без апострофов	
bin2	Преобразование двоичного целого в	
dec(X)	десятичное.	
	Двоичное число указывается в качестве	

	аргумента в апострофах, а десятичное выводится без апострофов	
hex2	Преобразование шестнадцатеричного целого в	
dec(X)	десятичное.	
	Шестнадцатеричное число указывается в	
	качестве аргумента в апострофах с использованием	
	заглавных или строчных букв, а десятичное	
	выводится без апострофов	

Выражение — это объект языка МАТLAB, представляющий собой имеющую смысл совокупность констант, переменных и функций, объединенных символами операций.

К основным типам выражений относятся арифметические и логические выражения.

Арифметическим выражением называют имеющую математический смысл совокупность констант, переменных и функций, объединенных символами (или функциями) арифметических операций:

>> x+sin(a)-sqrt(c+b);

Приоритет операций в арифметических выражениях устанавливается с помощью круглых скобок и старшинства операций внутри них, а именно: сначала вычис- ляются функции, затем возведение в степень, затем умножение и деление и в заключение — сложение и вычитание. Операции одного ранга выполняются слева направо.

Погическим выражением называют имеющую математический смысл совокупность арифметических выражений, объединенных символами (или функциями) операций отношения и логических операций:

>> (i==j)&((a+b)>sqrt(c));

Простейшим логическим выражением является *отношение*. Результатом вычисления логического выражения будет логическая константа 1 (true) или 0 (false):

```
>> sin(3)<0.5
ans =
1
```

Приоритет операций в логических выражениях устанавливается с помощью круглых скобок и старшинства операций внутри них, а именно: сначала вычисляются арифметические выражения, затем выполняются операции отношения и в заключение — логические операции. Операции одного ранга выполняются слева направо.

Символ операции — это символическое обозначение операции с операндами или операндом (объектами, с которыми выполняется операция).

Функция операции — это эквивалентное обозначение символа операции в виде функции MATLAB.

Большинство символов операций дублируется эквивалентными функциями, однако некоторые операции обозначаются только символом, другие — только функцией.

Основные символы и дублирующие их функции операции, сгруппированные по назначению, представлены в табл. 1.6—1.8, где переменные X и Y — числовые матрицы, а с — скаляр.

Полный список символов и функций операций выводится по команде: help ops

Си	Функци	Операция	
МВОЛ	R		
+	plus(X,Y)	Сложение матричное и	
		поэлементное	
-	minus(X,Y)	Вычитание матричное и	
		поэлементное	
*	mtimes(X,Y)	Матричное умножение	
•*	times(X,Y)	Поэлементное умножение	
^	mpower(X,c)	Матричное возведение в целую степень	
•^	power(X,c)	Поэлементное возведение в степень	
\	mldivide(X,Y)	Левое матричное деление	
/	mrdivide(X,Y)	Правое матричное деление	
.\	ldivide(X,Y)	ide(X,Y) Левое поэлементное деление	
./	rdivide(X,Y)	Правое поэлементное деление	

Таблица 1.6. Символы и функции арифметических операций

Таблица 1.7. Символы и функции операций отношения

Си мвол	Фу нкция	Операция
==	eq(X,Y)	Равно
~"	ne(X,Y)	Не равно
<	lt(X ,Y)	Меньше
>	gt(X,Y)	Больше
<=	le(Меньше либо равно

	X,Y)	
>=	ge(X,Y)	Больше либо равно

Таблица 1.8. Символы и функции логических операций

Си мвол	Фу нкция	Операция
&	and(X,Y)	И (AND) — истина (true — логическая константа 1), если оба аргумента — истина
	or(X,Y)	ИЛИ (OR) — истина, если хотя бы один аргумент — истина
~	not (X)	HE (NOT) — ложь (false — логическая константа 0), если аргумент — истина, и наоборот

1.1.3. Рабочая область памяти Workspace

В МАТLАВпеременные текущей сессии хранятся в рабочей области памяти, называемой Workspace. Окно Workspace, открываемое по одноименной команде в меню Desktop, содержит построчный список имен переменных (Name), каждую с ее символическим изображением и значением (Value) или размером и типом.

Двойной щелчок левой кнопки мыши на переменной в столбце Name или Value открывает окно Variable Editor (Редактор переменной), в котором наглядно отображается переменная и допускается ее редактирование.

Сохранение данных на диске

Для того чтобы в следующих сессиях воспользоваться данными текущей сессии, их можно сохранить на диске в файле с расширением mat по команде:

save <имяфайла><списокпеременных>

где:

<имя файла> — имя mat-файла; если оно не указано, то по умолчанию mat-файлу присваивается имя первой переменной из <_{списка переменных}>, а сама первая переменная при этом не сохраняется; <_{список переменных}> — список сохраняемых переменных, указываемых через пробел.

Данные — mat-файлы — по умолчанию сохраняются на диске в текущей папке. Например:

>> n = 1:100; x = sin(0.5*pi.*n); y = cos(0.5*pi.*n);

>> save sigx n x y

Значения переменных n, x, y будут сохранены в файле sigx.mat в текущей папке.

По команде:

load <имя файла>

выполняется обратная процедура — загрузка данных (mat-файла) с диска в рабочее пространство памяти Workspace, например:

>> load sigx

Для систематизации сохраняемых файлов с различным назначением и расширением удобно создавать собственные папки.

Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением режима прямых вычислений и базовых объектов языка MATLAB.

Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Запуск системы MATLAB и знакомство с ее интерфейсом.

Пояснить, какие окна образуют интерфейс MATLAB.

2. Знакомство со справочной системой MATLAB в формате HTML. Пояснить, как обратиться к справочной системе.

3. Ввод комментария в окне Command Window.

Ввести наименование лабораторной работы.

Пояснить, какой символ используется для ввода комментария.

4. Знакомство с командами языка MATLAB.

Выполнить команду:

help general

Пояснить назначение и формат команды help.

О каких объектах языка MATLAB будет выдана справка?

5. Очистка окна **Command Window.**

Пояснить, какая команда используется.

6. Ввод вещественных констант.

Ввести следующие константы в обычной форме и форме Е без символа ";" в конце строки:

0 0,000 0,814 --0,814 8,14 · 10⁻⁷ 0,814578942 0,9999999999 0,0000814765178 8145,7 --8145,577777777 0,814557·10⁵ Пояснить:

Пояснить:

- смысл символа ";" в конце строки;
- какой переменной присваиваются значения вводимых констант;

• в каком случае при вводе констант целесообразно использовать форму Е;

в каком формате выводятся константы по умолчанию;

• как вывести указанные константы с максимальным количеством значащих цифр в дробной части;

• какое количество значащих цифр в дробной части будет максимальным;

• какие форматы предусмотрены для вывода вещественных констант;

• какую форму Е называют нормализованной.

7. Ввод комплексных констант.

Ввести следующие константы без символа ";" в конце строки:

0,057+0,5j 0,057+0,5i 1200000,5+56i 1200000,57857+56i 12,5+56i 12,5+0,000056i -0,9999999i 0i $17+10^{-5}i$ $15 \cdot 10^{-5}i$

Пояснить:

• в какой форме вводятся комплексные константы;

• в какой форме вводятся их вещественные и мнимые части;

• в каком формате выводятся комплексные константы по умолчанию;

• какой формат целесообразно выбрать для вывода указанных констант;

• какая из констант списка будет воспринята как вещественная.

8. Ввод логических констант.

Ввести константы true и false без символа ";" в конце строки.

Пояснить, какие значения будут выведены и какой переменной присвоены.

9. Ввод символьных констант.

Ввести константы:

• ФИО;

• наименование лабораторной работы.

Пояснить, как вводятся и выводятся символьные константы.

10. Ввод векторов.

Ввести векторы — строки и столбцы — со следующими элементами: -0,9; 125; 0; 5+3i; 12i;

-0,9; 125; 0; 5; 12;

1; 2; 4; 5; 12.

Пояснить:

• какие символы используются при вводе векторов;

• как в MATLAB воспринимаются скаляры и векторы.

11. Ввод матрицы.

Ввести матрицы 3×3 и 3×2 с произвольными элементами.

Пояснить, что называют размером и порядком матрицы.

12. Ввод переменных.

Присвоить произвольные значения простой переменной, вектору и матрице.

Пояснить, как выбираются имена переменных и как переменные воспринимаются в MATLAB.

13. Знакомство с особенностями ввода комплексных переменных.

Присвоить переменной і значение 5.

Присвоить переменной F значение комплексной константы 5+3i, которую ввести двумя способами: без символа умножения в мнимой части; с символом умножения.

Пояснить:

в каком из этих случаев и почему возникает ошибка;

• как предотвратить возникновение ошибок в подобных случаях.

14. Знакомство со стандартными функциями с комплексным аргументом.

Присвоить переменной произвольное комплексное значение.

Вычислить модуль, аргумент, вещественную и мнимую части переменной.

Присвоить другой переменной значение комплексно сопряженной константы.

Пояснить, какие стандартные функции для этого используются.

15. Ввод арифметических выражений.

Присвоить переменным a, b и c значения произвольных вещественных констант, не равных нулю.

Вычислить значения переменных d и е по следующим формулам:

$$d = a + b \sin(\pi/a + b/c) - \cos a \pi$$
$$e = a^2 - \sqrt{|b|} + \sqrt[3]{c} + \frac{d + ac}{b}$$

Пояснить:

• приоритет выполнения операций в арифметических выражениях;

• что является результатом вычисления арифметического выражения.

16. Ввод логических выражений.

Используя переменные предыдущего пункта, записать логическое выражение с использованием операций отношения и вычислить его значение.

Добавить в данное выражение логические операции и вычислить значение нового логического выражения.

Пояснить:

• приоритет выполнения операций в логических выражениях;

• что является результатом вычисления логического выражения.

17. Знакомство со стандартными переменными.

Ввести арифметические выражения, которым по умолчанию будут присвоены константы Nan и Inf.

Пояснить назначение данных констант.

18. Знакомство со стандартными функциями округления.

Выполнитьследующиевычисления:

floor([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7]) ceil([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7]) convergent([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7]) nearest([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7]) round([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7])

fix([8.2 8.5 8.7 -8.2 -8.5 -8.7])

Привести и пояснить полученные результаты.

19. Знакомство со стандартными функциями преобразования систем счисления.

Записать произвольное целое десятичное число и преобразовать его в шестнадцатеричное и двоичное.

Выполнить обратные преобразования.

Пояснить, какие стандартные функции использовались для преобразования.

20. Сохранение переменных на диске.

Присвоить переменным А, В и С произвольные значения и сохранить их в текущей папке в файле с произвольным именем.

Пояснить:

• какая команда используется для сохранения данных;

- как выбирается имя файла данных;
- какое расширение имеют файлы данных.
- 21. Знакомство с рабочим пространством памяти Workspace.

Выполнить следующие действия:

• очистить и проверить содержимое Workspace;

• загрузить сохраненный файл данных (см. п. 20) и вывести значение переменных А, В, С в окне **Command Window**;

• проверить содержимое Workspace;

• удалить из Workspace переменную А и проверить содержимое Workspace.

Пояснить назначение Workspace и выполняемые команды.

22. Завершение работы MATLAB.

1.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты:

1С. Ввод вещественных констант.

Привести примеры ввода вещественных констант, для которых удобен обычный формат и формат E, а также тех, для которых, независимо от формы ввода, количество значащих цифр после запятой будет ограничено.

2С. Операции с комплексными константами.

Ввести вещественные константы:

i = 7; j = 5;

и определить, в каком из следующих случаев будут выведены комплексные константы:

(5+7i)*(5+7*j)

(5+7*i)*(5+7*j)(5+7i)*(5+7j)

i = sqrt(-1); (5+7*i)*(5+7j) j = sqrt(-1); (5+7*i)*(5+7*j)

3С. Вычисление арифметических выражений.

Присвоить простым переменным a, b и с произвольные значения и записать арифметические выражения для вычислений по следующим формулам:

$$c^{2+b}\frac{a+b}{a-b} + \sqrt{\frac{a-b}{q+b}}e^{\frac{a-b}{a+b}}$$
$$c^{2}+b\frac{a+b}{a-b} \times \frac{\sqrt{a}-\sqrt[3]{b}}{a^{2}+b^{3}}$$
$$\frac{a+b}{a-c} + c^{1/3}\sin\frac{a-b}{a+b}$$

4С. Для четырех комбинаций логических констант х и у (00, 01, 10 и 11) вычислить значения логического выражения (составить таблицу истинности):

$$f = \overline{xy} \lor (\overline{x} \lor y \lor xy),$$

где символу "∨" соответствует логическая операция "ИЛИ".

5С. Операции со стандартными функциями.

Привести пример арифметического выражения с использованием стандартных функций, включая функции округления.

Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Для чего предназначена система MATLAB?
- 2. Назовите окна интерфейса МАТLAВ и поясните их назначение.

3. Дайте определение следующим понятиям: текущая сессия, режим прямых вычислений.

- 4. Назовите базовые объекты языка MATLAB.
- 5. Дайте определение команды.
- 6. Дайте определение константы.

- 7. Какие типы констант используются в MATLAB?
- 8. Как вводятся комплексные константы?
- 9. Какие форматы вывода констант используются в MATLAB?
- 10. Дайте определение формы Е и нормализованной формы Е.
- 11. Какие константы называют стандартными?

12. Дайте определение переменной и поясните, с помощью какого оператора ей присваивается значение.

- 13. Дайте определение массива.
- 14. Чем характеризуется массив?
- 15. Дайте расшифровку названия "МАТLAB" и поясните его смысл.
- 16. Как вектор и скаляр воспринимаются в MATLAB?
- 17. Чему равна нижняя граница индексов матрицы в МАТLАВ?
- 18. Как вводятся матрица, вектор и скаляр?
- 19. Чему соответствует простая переменная в МАТLАВ?
- 20. Дайте определение выражения в MATLAB.
- 21. Какие типы выражений используются в MATLAB?
- 22. Дайте определение арифметического и логического выражений

2. Операции с матрицами

Цель работы: овладеть навыками матричной обработки данных в MATLAB.

Краткая теоретическая справка

Как уже говорилось ранее (см. разд. 1.1.2), в МАТLАВ любая переменная по умолчанию считается матрицей.

Матрица представляется своим именем (идентификатором) и характеризуется размером и типом.

Размер матрицы принято указывать произведением m×n, где m, n — число строк и столбцов соответственно. Матрицу размером n×n называют квадратной порядка n. Вектор воспринимается как матрица размером 1×n (строка) или m×1 (столбец), а скаляр — как матрица размером 1×1.

Хранение матриц в оперативной памяти организовано по столбцам.

Тип матрицы определяется типом ее элементов. В этой работе по умолчанию под матрицей будем подразумевать числовую матрицу.

Ввод матриц рассматривался в разд. 1.1.2.

Вектор, формирующий регулярную сетку, вводят в виде:

<начальное значение>:[<шаг>:]<конечное значение>

Шаг, равный единице, можно не указывать, условным признаком чего служат квадратные скобки.

Например:

>> y = 0:pi/4:pi y =

Элементы матрицы могут быть представлены численными константами, простыми переменными, арифметическими выражениями и, в свою очередь, матрицами, например:

>> A = [5.3 sin(pi/4) 3+4i]

A =5.3000 0.7071 3.0000 + 4.0000i>> a = [1 2;3 4], b=[4 5;6 7] A =1 2 3 4 B =4 5 6 7 >> B = [a b] $\mathbf{B} =$ 1 2 4 5 3 4 6 7

Обращение к элементу матрицы происходит по ее имени с указанием индексов строки и столбца в круглых скобках (нижняя граница индексов равна единице):

>> B(2,4) ans = 7

По обращению B(i) матрица В воспринимается как вектор, элементы которого сформированы по столбцам:

>> B(5) ans = 4

Размер матрицы — число строк и столбцов — определяется с помощью функции: size(x)

Длина вектора — число элементов строки (столбца) — определяется с помощью функции:

length(x)

Матрица нулевой размерности — пустая матрица — обозначается как А

= []:

>> A = []; size(A) ans = 0 0 Имя пустой матрицы сохраняется в Workspace и в дальнейшем может использоваться для формирования матрицы любого размера.

2.1.1. Функции генерации типовых матриц

В MATLAB можно генерировать большое разнообразие типовых матриц с помощью встроенных функций, список которых может быть выведен по команде:

help elmat

Некоторые из них приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Функции генерирования типовых матриц

Функци	Типовая матрица
zeros(M,N)	Нулевая матрица М×N
ones(M,N)	Матрица единиц М×N
eye(N)	Единичная матрица порядка N
rand(M,N)	Матрица М×N случайных чисел в диапазоне от 0 до 1, распределенных по равномерному закону
randn(M,N)	Матрица М×N случайных чисел, распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией, равной 1
diag(V)	Вектор из диагональных элементов квадратной матрицы V. Диагональная матрица — матрица, у которой все элементы равны нулю, кроме диагональных, равных вектору V
toeplitz(r)	Матрица Теплица — квадратная матрица с одинаковыми элементами на диагоналях, равными соответствующим элементам первого столбца r

2.1.2. Преобразование матриц

К операциям преобразования матриц относятся: \$\$\\$Bыделение из матрицы вектора-столбца: A(:,N) где N — номер столбца; \$\$\\$Bыделение из матрицы вектора-строки: A(M,:)где M — номер строки; \$\$\\$Bыделение подматрицы с указанием граничных индексов: A(M1:M2,N1:N2) где M1:M2 — номера строк с M1 по M2 включительно; N1:N2 — номера столбцов с N1 по N2 включительно;

A(M1:end;N1:end)

где M1:end — строки с M1 до последней включительно; N1:end — столбцы с N1 до последнего включительно;

%растягивание матрицы в вектор-столбец:

A(:)

%горизонтальная конкатенация (объединение) подматриц (по столбцам):

А = [A1,A2,A3,...] где A1,A2,A3,... — объединяемые подматрицы с одинаковым числом строк; вертикальная конкатенация подматриц (по строкам):

А = [A1;A2;A3;...] где A1;A2;A3;... — объединяемые подматрицы с одинаковым числом столбцов;

*%*копирование матрицы, выполняемое с помощью функции:

repmat(A,m,n)

где А — исходная матрица как элемент новой матрицы; m, n — число копий матрицы А по строкам и столбцам соответственно;

где А — исходная квадратная матрица как элемент новой квадратной матрицы; n — число копий матрицы А по строкам и столбцам.

2.1.3. Поэлементные операции с матрицами

К поэлементным операциям с матрицами относятся арифметические операции и вычисление элементарных функций, аргументы которых — матрицы.

Признаком поэлементных арифметических операций умножения, деления и возведения в степень является точка перед символом операции:

>> A = [1 2 3;2 -1 5;1 -1 -1], B = [-1 -2 -3;-4 -5 -6;-7 -8 -9] A =1 2 3 2 -1 5 -1 -1 1 B =-1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 >> A.*B ans =-1 -4 -9 -8 5 -30 $-7 \quad 8 \quad 9 >> A./sin(B)$ ans =

-1.1884 -2.1995 -21.2585 2.6427 -1.0428 17.8945 -1.5221 1.0108 2.4265

Операции с матрицами в задачах линейной алгебры

К простейшим операциям с матрицами в задачах линейной алгебры относятся:

\$%арифметические операции;

\$\$транспонирование и эрмитово сопряжение;

%обращение;

%матричное деление.

Арифметические операции с матрицами

К арифметическим операциям с матрицами относятся:

Сложение и вычитание матриц одинакового размера.

Суммой (разностью) матриц **A** и **B** размером m×n называется матрица C того же размера с элементами, равными сумме (разности) соответствующих элементов матриц **A** и **B**. Для операций сложения и вычитания матриц справедливы обычные законы арифметики:

$$A + B = B + A;$$

$$A - B = -B + A.$$

Пример сложения матриц:

>> A = [1 2 3; 2 - 1 5; 1 - 1 - 1]; B = [-1 - 2 - 3; -4 - 5 - 6; -7 - 8 - 9];>> C = A+B C= 0 0 0 -2 -6 -1 -6 -9 -10

%умножение матрицы на скаляр (число), эквивалентное операции поэлементного умножения на скаляр;

Sумножение матрицы на матрицу.

Операция умножения возможна только в том случае, если число столбцов матрицы **A** равно числу строк матрицы **B**.

Произведением матрицы A размером m×n на матрицу B размером n×p называется матрица C размером m×p, элемент i-й строки и k-го столбца которой равен сумме произведений соответственных элементов i-й строки матрицы A и k-го столбца матрицы B:

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^{k} ab_{ij \ jk}; i = 1, 2, ..., m; k = 1, 2, ..., p.$$

В общем случае умножение матриц не коммутативно:

AB≠ BA.

Пример умножения матриц: >> D = [1 2 5 7;3 8 0 3]

```
D =
       2 5 7
  1
  3
       8
           0
               3
>> size(D)
ans =
>> F = [1 2 0; 3 8 5; 0 3 4; 9 7 1]
\mathbf{F} =
   1
       2
           0
  3
     8 5
     3
  0
         4
     7 1 \gg \text{size}(F)
  9
ans =
    4
        3
>>D*F
ans =
      82 37
  70
  54
       91
           43
```

2 4

Транспонирование и эрмитово сопряжение матриц

Транспонирование матрицы — это операция замены каждой строки столбцом с тем же номером.

Эрмитово сопряжение матрицы — это операция транспонирования матрицы с одновременной заменой ее элементов на комплексно сопряженные.

Операции транспонирования и эрмитова сопряжения выполняются с помощью *одного* и *того же символа* "" (апостроф). Результат зависит от исходной матрицы — является она вещественной или комплексной. В первом случае получим транспонированную, а во втором — эрмитово сопряженную матрицу:

>> A = [1 2 3;4 5 6;7 8 9] A = 1 2 3 4 5 6 7 8 9

>> A' ans =1 4 7 2 5 8 3 6 9 >> C = [3+2i 4-5i;7-5i 1+i;2+2i 1-8i] C =3.0000 + 2.0000i 4.0000 - 5.0000i $7.0000 - 5.0000i \quad 1.0000 + 1.0000i$ 2.0000 + 2.0000i 1.0000 - 8.0000i>> C'ans =3.0000 - 2.0000i 7.0000 + 5.0000i 2.0000 - 2.0000i4.0000 + 5.0000i 1.0000 - 1.0000i 1.0000 + 8.0000i

Транспонирование комплексной матрицы выполняется с помощью символа поэлементного транспонирования:

>> C.'

ans =

3.0000 + 2.0000i 7.0000 - 5.0000i 2.0000 + 2.0000i

 $4.0000 - 5.0000i \quad 1.0000 + 1.0000i \quad 1.0000 - 8.0000i$

Матрицу с комплексно сопряженными элементами можно получить путем транспонирования эрмитово сопряженной матрицы или с помощью функции conj

(см. табл. 1.4): >> (С').' ans = 3.0000 — 2.0000i 4.0000 + 5.0000i 7.0000 + 5.0000i 1.0000 — 1.0000i 2.0000 — 2.0000i 1.0000 + 8.0000i >> conj(C) ans = 3.0000 — 2.0000i 4.0000 + 5.0000i 7.0000 + 5.0000i 1.0000 — 1.0000i 2.0000 — 2.0000i 1.0000 + 8.0000i

2.1.4.3. Обращение матриц

Матрица **В** называется обратной к матрице **A**, если произведение этих матриц дает единичную матрицу **I**:

AB = BA = I

Матрица, обратная к матрице A, обозначается как A^{-1} .

Операция обращения возможна только для квадратных матриц с определителем (детерминантом), не равным нулю.

Определитель матрицы вычисляется с помощью функции: det(A)

```
а обратная матрица — с помощью функции:
inv(A)
Например:
>> A = [1 2; 4 5]
A =
  1
      2
  4
      5
>> det(A)
ans =
   -3
\gg inv(A)
ans =
 -1.6667 0.6667
  1.3333 -0.3333
```

2.1.4.4. Матричное деление

В списке символов арифметических операций содержатся два символа матричного деления с *квадратными* матрицами А и В порядка n (см. табл. 1.6):

 AB^{-1} , r. e. A*inv(B).

Символ левого матричного деления "\" используют при решении систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

Ax = b,

(2.1)

где А — матрица коэффициентов при неизвестных; b, х — векторыстолбцы свободных членов и неизвестных соответственно.

Умножив обе части (2.1) на А⁻¹ слева, получим решение системы в виде:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b} \tag{2.2}$$

что в MATLAB соответствует выполнению операций inv(A)*B, т. е. левому матричному делению:

 $>> X = A \setminus B$

Пример решения системы уравнений (2.1):

$$\begin{cases} x_1 + 5x_2 = 4\\ \{-x_1 + 7x_2 = 8. \end{cases}$$

>> A =
$$[1 5; -1 7]$$
, B = $[4 8]$
A =
 $1 5$
 $-1 7$
B =

Проверим правильность решения по (2.1) — получим вектор-столбец В: >> A*X ans =

Деление B/A будет ошибочным, т. к. эта операция соответствует BA^{-1} (B*inv(A)), а умножение матриц в общем случае не коммутативно: $A^{-1}B \neq BA^{-1}$ (см. разд. 2.1.4.1):

>> B/A ans =

3.0000 -1.0000

Норма матрицы и вектора

Норма матрицы (вектора) — это скаляр, с помощью которого оцениваются значения элементов матрицы (вектора).

Среди норм матрицы А и вектора Х выделим следующие основные:

⊛норма, ||*A*||₁определяется как максимальная сумма модулей элементов в столбце:

$$\|A\|_{1} = \max_{j} \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}|$$
2.3)

Аналогичная норма для вектора равна сумме модулей элементов вектора: $||x||_1 = \sum_{i=1}^m |x_i|(2.4)$

«Внорма ||*A*||∞ определяется как максимальная сумма модулей элементов в строке:

$$||A||_{\infty} = \max_{i} \sum_{j=1}^{m} |a_{ij}|$$
 2.5)

Аналогичная норма для вектора равна максимальному элементу вектора:

$$\|x\|_{\infty} = \max_{i} |x_{i}|$$

$$2.6)$$

 $hopma ||A||_2$ (евклидова норма) определяется как корень квадратной из суммы квадратов модулей всех элементов матрицы:

$$\|A\|_{2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}|^{2}}$$
 2.7)

Аналогичная норма для вектора:

$$\|x\|_{2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} |x_{i}|^{2}}$$
 2.8)

Норма матрицы и вектора вычисляется с помощью функции: **norm(A,p)**

где р — параметр, указывающий норму и принимающий значения: 1 — для $||A||_1$

2 — для 2 ||A|| (по умолчанию); inf — для ||A||_∞ >> A = [1 2;4 5] A = 1 2 4 5 >> NORMS = [norm(A,1) norm(A) norm(A,inf)] NORMS = 7.0000 6.7678 9.0000

2.1.6. Операции с матрицами в задачах математической статистики

Для решения задач математической статистики предусмотрен набор встроенных функций, список которых может быть выведен по команде:

help datafun

Основные из них приведены в табл. 2.2.

Функ	Назначение	
ция		
max(A)	Максимальные элементы столбца	
min(A)	Минимальные элементы столбца	
sort(A)	Сортировка элементов столбца по возрастанию	
sum(A)	Сумма элементов столбца	
prod(A)	Произведение элементов столбца	
mean(A)	Математическое ожидание (среднее значение) элементов столбца	
std(A)	Среднеквадратическое (стандартное) отклонение (СКО), вычисляемое по формуле: СКО $(a_{1i} - \overline{a}_i)^2 + (a_{2i} - \overline{a}_i)^2 + \dots + (a_{mi} - \overline{a}_i)^2$	
	$=\sqrt{\frac{(m-1)}{(m-1)}}$	

	A A	み	v	
Габлица	11	Оункшии	математической	статистики
гаолица	_ • _ •	тупкции		e la l'he l'han

	где: $a_{ij}, i=1, 2,, m; j=1,2,,n - элемент матрицы A;$ $\overline{a}_j, j=1, 2,, n - математическое ожидание (среднее значение) элементов j-го столбца; m - количество строк, n - количество столбцов$
std(A,1)	Среднеквадратическое (стандартное) отклонение (СКО), вычисляемое по формуле: СКО $= \sqrt{\frac{(a_{1j} - \overline{a}_j)^2 + (a_{2j} - \overline{a}_j)^2 + \dots + (a_{mj} - \overline{a}_j)^2}{m}}$
var(A)	Дисперсия элементов столбца, вычисляемая по формуле: $\sigma_j^2 = \frac{(a_{1j} - \overline{a}_j)^2 + (a_{2j} - \overline{a}_j)^2 + \dots + (a_{mj} - \overline{a}_j)^2}{(m-1)}$
var(A,1)	Дисперсия элементов столбца, вычисляемая по формуле: $\sigma_j^2 = \frac{(a_{1j} - \overline{a}_j)^2 + (a_{2j} - \overline{a}_j)^2 + \dots + (a_{mj} - \overline{a}_j)^2}{m}$

2.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением типовых операций с матрицами в MATLAB в режиме прямых вычислений.

2.3. Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Определение длины вектора и размера матрицы.

Ввести:

• произвольную матрицу А;

• пустую матрицу Z;

• вектор В в виде регулярной сетки с начальным элементом –π, конечным π и шагом π/32.

Определить размеры матриц и длину вектора.

Пояснить:

• что такое длина вектора и размер матрицы и как они определяются в MATLAB;

с какой целью и как вводится пустая матрица и каков ее размер;

• как вводится регулярная сетка; в каком случае допускается не указывать шаг изменения значения переменной.

2. Генерирование типовых матриц.

Сгенерировать следующие квадратные матрицы 3-го порядка:

нулевую матрицу С;

• матрицу единиц D;

• единичную матрицу D1;

• матрицу Теплица Т с произвольными вещественными элементами первого столбца;

• матрицу Е случайных чисел, распределенных по равномерному закону;

• матрицу F случайных чисел, распределенных по нормальному закону.

Пояснить:

• как выполняется генерация указанных матриц в MATLAB;

• что собой представляют матрицы: нулевая, единиц, единичная и Теплица.

3. Выделение элементов матрицы.

В матрице F (см. п. 2) выделить:

• второй элемент третьей строки;

• вектор диагональных элементов;

• первую строку;

• третий столбец;

• подматрицу с номерами строк 2:3 и номерами столбцов 1:3.

Пояснить, как происходит выделение подматриц.

4. Преобразование матриц.

Произвести с матрицей F (см. п. 2) следующие преобразования:

• выполнить горизонтальную конкатенацию матрицы F с матрицей C (см. п. 2);

• выполнить вертикальную конкатенацию матрицы F с матрицей D (см. п. 2);

• сформировать квадратную матрицу G 6-го порядка посредством копирования матрицы F.

Пояснить, как выполняются указанные преобразования.

5. Поэлементные операции с матрицами.

Для всех элементов матрицы F (см. п. 2) выполнить операцию возведения в квадрат и умножения на 2.

Пояснить, какие символы арифметических операций использованы.

6. Сложение и вычитание матриц.

Ввести квадратные матрицы А и В 3-го порядка с произвольными вещественными элементами.

Выполнить операции сложения и вычитания матриц А и В и присвоить результаты переменным С1 и С2.

Пояснить:

• что собой представляют переменные C1 и C2;

• является ли операция сложения (вычитания) матриц коммутативной.

7. Умножение матриц.

Ввести матрицы A и B с произвольными вещественными элементами. Размеры матриц выбрать так, чтобы для этих матриц была возможна операция умно- жения.

Выполнить умножение матрицы А на матрицу В и присвоить результат переменной С.

Пояснить:

• как должны быть согласованы размеры матриц А и В, чтобы для них была возможна операция умножения;

• что собой представляет переменная С;

• является ли операция умножения матриц коммутативной.

8. Транспонирование и эрмитово сопряжение матриц.

Выполнить следующие операции:

• транспонировать матрицу F (см. п. 2);

• сформировать квадратную матрицу Р 3-го порядка с произвольными комплексными элементами;

• транспонировать матрицу Р;

• сформировать матрицу R, эрмитово сопряженную с матрицей P;

• сформировать матрицу R1 с комплексно сопряженными элементами относительно матрицы P.

Пояснить, как указанные операции выполняются в MATLAB.

9. Обращение матриц.

Выполнить следующие операции:

• вычислить определитель матрицы F (см. п. 2);

• сформировать матрицу F1, обратную к матрице F;

• найти произведение матриц F и F1 и присвоить результат переменной F2.

Пояснить:

• для какой матрицы возможна операция обращения;

• какая функция служит для вычисления определителя матрицы;

• что собой представляет переменная F2 и с какой целью она вычислена.

10. Решить СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 14; \\ 2x_1 - x_2 - 5x_3 = -15; \\ x_1 - x_2 - x_3 = -4 \end{cases}$$

11. и проверить правильность решения.

Пояснить, какая операция матричного деления используется и почему.

12. Вычисление норм матрицы и вектора.

Для матрицы F (см. п. 2) вычислить нормы (2.3), (2.5) и (2.7).

Для вектора X = rand(1,100) вычислить нормы (2.4), (2.6) и (2.8).

Пояснить смысл указанных норм и способ их вычисления в MATLAB.

13. Операции с матрицами в задачах математической статистики. Для матрицы F (см. п. 2) вычислить: • максимальные и минимальные элементы столбцов;

• сумму и произведение элементов столбцов;

• средние значения элементов столбцов;

• СКО элементов столбцов с помощью функции std(F,1);

• дисперсию элементов столбцов с помощью функции var(F,1). Пояснить:

• какие функции MATLAB использованы в каждом из этих случаев (кроме std и var);

• как проверить правильность результатов согласно определению среднего значения, СКО и дисперсии.

2.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты:

1С. Операции с матрицами.

Привести пример арифметического выражения, в котором все переменные и результат вычисления — матрицы.

Вычислить статистические характеристики и нормы результирующей матрицы.

2С. Обращение, транспонирование и эрмитово сопряжение матрицы.

Выполнить для матрицы Теплица 5-го порядка.

3С. Решение СЛАУ:

 $\begin{cases} 5x_1 + 2x_2 - 7x_3 - 0.5x_4 + 9 = 0; \\ x_1 - 0.3x_2 + 9x_3 + 5 = 0; \\ 6x_1 + x_2 - 8x_3 - 19 = 0; \\ 3x_2 + 4x_3 - 2x_4 = 0; \end{cases}$

с проверкой правильности решения.

2.5. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Дайте определение матрицы.
- 2. Что такое размер и порядок матрицы?
- 3. Как вектор и скаляр воспринимаются в MATLAB?
- 4. Чем определяется тип матрицы?
- 5. Как вводятся матрица, вектор и скаляр?
- 6. Чему равна нижняя граница индексов матрицы в MATLAB?
- 7. Как обратиться к элементу матрицы и вектора?

8. Что такое пустая матрица? С какой целью она вводится и каков ее размер?

9. Что такое регулярная сетка и как она вводится в MATLAB?

10. Как определить размер матрицы и длину вектора в MATLAB?

11. Как в MATLAB сформировать следующие матрицы: нулевую; единиц; единичную; случайных чисел, распределенных по равномерному и нормальному законам?

12. Как из матрицы выделить вектор-строку и вектор-столбец?

13. Как из матрицы выделить подматрицу с произвольными граничными индек- сами? С произвольными начальными индексами?

14. Как матрицу растянуть в вектор-столбец?

15. Как выполнить копирование матрицы?

16. Какие символы используются для поэлементных арифметических операций с матрицами?

17. Что такое транспонирование матрицы и как оно выполняется в MATLAB?

18. Что такое эрмитово сопряжение матрицы и как оно выполняется в MATLAB?

19. Дайте определение обратной матрицы и поясните, как она вычисляется в MATLAB.

20. Как в MATLAB вычислить определитель матрицы?

21. Для каких матриц допустима операция матричного умножения и какой символ операции используется?

22. Какие символы матричного деления используются в MATLAB и чем они отличаются? Какой из них используется при решении СЛАУ?

23. Как в MATLAB вычисляются различные нормы матрицы и вектора?

24. Как в MATLAB вычисляются среднее значение, дисперсия и СКО матрицы?

3. Типы массивов

Цель работы: изучить основные типы массивов, используемых в MATLAB, и овладеть навыками их формирования.

3.1. Краткая теоретическая справка

В МАТLAВ тип массива (тип данных) определяется типом его элементов. По умолчанию мы имели дело с матрицами, элементы которых представлены константами в форме с плавающей точкой (ПТ) с двойной точностью. Такие массивы относятся к типу double.

Основные типы числовых и нечисловых массивов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Типы массивов в MATLAB

Символи	Turn and some a	Функция
ческое		тереблагор
обозначение	тип массива	преобразов
типа массива		ания типа

	Числовой:	
double	вещественный двойной точности	double(X)
single	вещественный одинарной точности	single(X)
int8	целый 8-битовый со знаком	int8(X)
uint8	целый 8-битовый без знака	uint8(X)
int16	целый 16-битовый со знаком	int16(X)
uint16	целый 16-битовый без знака	uint16(X)
int32	целый 32-битовый со знаком	int32(X)
uint32	целый 32-битовый без знака	uint32(X)
int64	целый 64-битовый со знаком	int64(X)
uint64	целый 64-битовый без знака	uint64(X)

Таблица 3.1 (окончание)

Символи ческое обозначение типа массива	Тип массива	Функция преобразован ия типа
logical	Логический	logical(X)
character (char)	Символьный	num2str(X)
structure (struct)	Структура (массив записей)	
cell	Массив ячеек	

3.1.1. Матрицы числового и логического типов

Преобразование матриц числового типа double в матрицы других числовых типов выполняется с помощью специальных встроенных функций (см. табл. 3.1).

При обработке матриц числового целого типа необходимо иметь в виду, что с ними запрещено выполнение некоторых арифметических операций и вычисление большинства встроенных функций, но разрешено выполнение операций отношения и логических операций:

```
>> A = [int8(159.7) int8(125.7) int8(-125.7)]
Α
      =
 127 126 - 126
>> B = [uint8(159.7) uint8(125.7) uint8(-125.7)]
В
      =
 160 126 0
>> C = [A < B; A = B; and(A,B)]
С
     =
 1
     0
         1
 0
     1
         0
 1
     1
         0
```

Элементами матрицы логического типа (logical array) являются логические константы, принимающие значения 1 (true — истина) или 0 (false — ложь), например, как в матрице С, или логические выражения (см. разд. 1.1.2):

>>x = $[\sin(3) < 0.5 \ 1; 0 \ (\sin(3) < 0.1) & (\cos(3) < 0.2)]$

 $\mathbf{x} =$

1 1

0 0

3.1.2. Матрицы символьного типа

Матрица символьного типа (char array) — это разновидность нечисловых матриц, элементами которой являются символьные константы (см. разд. 1.1.2).

Строки и столбцы матрицы символьного типа формируются по-разному, а именно:

>> a = ['Alla ' 'Woman ' 'Russian']

a =

AllaWoman Russian

>> a = ['Alla ';'Woman ';'Russian'] a = Alla Woman Russian

Автоматическое добавление пробелов в элементах столбца с выравниванием по левому краю выполняется с помощью функции: char('<char1>','<char2>'...)
где <charl>,<charl>... — элементы столбца с произвольным количеством символов.

Одна функция char описывает один столбец матрицы с символьными константами '<char1>','<char2>'...:

>> a = char('Alla','Woman','Russian')

a =

Alla

Woman

Russian

Матрицу символьного типа удобно формировать по столбцам, используя для каждого из них свою функцию char и предусматривая необходимое количество пробелов для разделения столбцов:

>> x = [char('a','aa','aaa') char(' bb',' bbb',' b') ... char(' cc',' ccc',' c')]

$\begin{array}{ccc} a & bb & cc \\ x = aa & bbb & ccc \\ aaa & b & c \end{array}$

Преобразование матрицы численного или логического типа в матрицу символьного типа выполняется с помощью функции num2str(x):

```
>> x = [57; -19]
\mathbf{x} =
       7
   5
  -1
       9
>> y = num2str(x)
y =
5 7
-19
Здесь х — матрица типа double, а у — матрица символьного типа:
>> [size(x); size(y)]
ans =
   2
       2
   2
       5
```

3.1.3. Структуры (массивы записей)

Структура (массив записей — struct array) — это разновидность нечислового массива, предназначенного для описания М объектов N параметрами.

Для описания структуры потребуется ввести ряд новых терминов:

Spinone (field) — имя параметра, описывающего объект: скаляра, вектора, матрицы¹ или нечислового массива;

у число полей равно количеству параметров N;

¹ Напомним (см. разд. 1.1.2), что по умолчанию в MATLAB любая переменная — матрица, а скаляр и вектор — ее частные случаи.

узначение поля — значение параметра;

список полей — список имен параметров;

узапись — список полей, одинаковый для всех М объектов;

\$94исло записей равно количеству объектов М;

Язначение записи — список полей с их значениями для одного объекта.

Структура (массив записей) — это упорядоченная совокупность значений записей, объединенная одним именем.

Имя массива записей выбирается так же, как обычно для переменной (см. разд. 1.1.2), а размер равен числу записей М.

Значение каждой і-й записи формируется отдельно по каждому п-му полю:

<имя массива>(<i>).<имя n-го поля> = <значение n-го поля>

Таким образом, для формирования М значений записей со списком из N полей потребуется М×N операторов присваивания.

Сформируем массив записей (структуру) с именем personal для описания трех объектов (M = 3) — трех членов кафедры — четырьмя параметрами (N = 4).

Запись включает в себя следующий список полей:

surname — фамилия — скаляр символьного типа;

Sposition — должность — скаляр символьного типа;

Sphd — наличие ученой степени — скаляр логического типа.

Сформируем значения массива записей personal по каждому полю:

>> personal(1).surname = 'Иванов';

>> personal(2).surname = 'Петров';

>> personal(3).surname = 'Сидоров';

```
>> personal(1).data = [1 2 1949];
```

```
>> personal(2).data = [5 7 1975];
```

```
>> personal(3).data = [5 8 1956];
```

```
>> personal(1).position = 'προφeccop';
```

```
>> personal(2).position = 'доцент';
```

```
>> personal(3).position = 'зав. лаб.';
```

```
>> personal(1).phd = true;
```

```
>> personal(2).phd = true;
```

```
>> personal(3).phd = false;
```

Список полей выводится по имени массива записей:

>> personal

personal =

1x3 struct array with fields:

surname

data

position

phd

Значение і-й записи выводится по имени массива записей с указанием индекса в круглых скобках. Например, значение 2-й записи:

```
>> personal(2)
ans =
surname: 'Петров'
data: [5 7 1975]
position: 'доцент'
phd: 1
```

Значение поля в *i-й записи* выводится по имени массива записей с указанием индекса в круглых скобках и имени поля. Например, значение поля surname первой записи:

>> personal(1).surname

ans =

Иванов

Значения поля во всех записях выводятся по имени массива с указанием имени поля.

Например, поля surname:

>> personal.surname

ans =

Иванов

ans =

Петров

ans =

Сидоров

Удаление поля выполняется с помощью функции:

<имя массива> = rmfield(<имя массива>,'<имя поля>')Например,

удалим поле data:

>> personal = rmfield(personal,'data')

personal =

1x3 struct array with fields:

surname

position

phd

Массивы ячеек

Массив ячеек (cell array) — это наиболее сложный тип массива, элементами которого являются ячейки, представляющие собой массивы любой размерности, любого размера и типа.

Элементы массива ячеек указываются в фигурных скобках.

Сформируем квадратную матрицу ячеек 3×3:

>> A{1,1} = pi; >> A{1,2} = [1 2 3;4 5 6]; >> A{1,3} = char('abs','angle'); >> A{2,1} = [ones(5,1)]'; >> A{2,2} = zeros(3,1); >> A{2,3} = 'Alla'; >> A{3,1} = 7 ; >> A{3,2} = rand(5,1); >> A{3,3} = personal; гдерегsonal — имяструктуры, сформированнойвразд. 3.1.3.

Вывод элементов массива ячеек выполняется по его имени с указанием индексов:

>> A{1,2} ans = 1 2 3 4 5 6 >> A{3,3} ans = 1x3 struct array with fields: surname age position phd

С элементами массива ячеек можно выполнять операции, разрешенные для данного типа массива с учетом согласования их размерностей и размеров, например:

>> B = sum(A{1,2})+A{1,1}

B =

8.1416 10.1416 12.1416

Графическое представление матрицы ячеек создается с помощью функции:

cellplot(A,'legend')

Определение типа массива

Для определения типа массива служит функция: class(<имя массива>) Например, для массива A, сформированного в разд. 3.1.4: >> class(A) ans =

cell

Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением типов массивов в MATLAB в режиме прямых вычислений.

Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Знакомство с матрицами числового и логического типов. Ввести матрицу А с элементами:

 $A = \begin{bmatrix} 127,1 & -127,1 & 127,7 \\ -127,7 & 0 & 128,4 \end{bmatrix}$

L-128,4 255,7 255,1

и выполнить с ней следующие действия:

• преобразовать в матрицу В целых 8-битовых чисел со знаком;

- преобразовать в матрицу С целых 8-битовых чисел без знака;
- преобразовать в матрицу D логического типа;
- определить тип матриц А, В, С, D.

Пояснить:

- как преобразовать матрицу А в матрицы В, С и D;
- по какому правилу формируются элементы матрицы В;
- по какому правилу формируются элементы матрицы C; по какому правилу формируются элементы матрицы D;
 - как определяется тип матрицы.
 - 2. Операции с матрицами числового типа.

Выполнить следующие операции:

- вычислить значения синуса всех элементов матриц A, B и C;
- вычислить суммы матриц A и B, B и C;

• проверить, являются ли элементы матрицы А числами, большими единицы, и определить вид и тип результата;

• выполнить логическую операцию "И" с матрицами В, С и определить вид и тип результата.

Сделать выводы по результатам выполнения операций.

3. Знакомство с матрицами символьного типа.

Выполнить следующие действия:

• сформировать трехэлементный вектор-строку X символьного типа с ФИО студента;

• сформировать трехэлементный вектор-столбец У символьного типа с ФИО студента;

• сформировать матрицу F символьного типа 2×2 с элементами:

 $F = \begin{bmatrix} \mathsf{K}\mathsf{H}\mathsf{X} & R = 15\\ FIR & Order = 15 \end{bmatrix};$

преобразовать матрицу А (см. п. 1)

в матрицу G символьного типа;

• определить типы матриц А и G.

Пояснить:

как обеспечить не слитный вывод элементов вектора-строки;

• как обеспечить автоматическое добавление пробелов при выводе элементов столбца;

• как преобразовать матрицу числового типа в матрицу символьного типа.

4. Знакомство с массивами записей (структурами).

Сформировать массив записей (структуру) с именем Filter для описания четырех фильтров.

Каждая запись должна содержать три поля со следующими именами и их значениями:

- Туре (типизбирательности) lowpass, highpass, bandpass, stopband;
- Order (порядок фильтра) 10, 20, 30, 40;
- Poles (наличиеполюсов) true, false, false, true.

Выполнить следующие действия с массивом Filter:

- вывести список полей;
- вывести значение 1-й записи;
- вывести значения поля Туре во всех записях;
- вывести значение поля Туре в 3-й записи;
- удалить поле Poles.

Пояснить:

- с какой целью создается массив записей;
- что собой представляет запись и значение записи;
- каков размер массива записей Filter.
- 5. Знакомство с матрицами ячеек.

Создать матрицу ячеек S 3×3, элементами которой являются сформированные ранее массивы:

$$S = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & F & G \\ X & Y & Filter \end{bmatrix}$$

Выполнить следующие действия:

- последовательно вывести элементы матрицы S и определить их тип;
- вывести графическое представление матрицы S.

Пояснить:

- из каких элементов создается матрица ячеек;
- как эти элементы вводятся;
- как выводится графическое представление матрицы ячеек;
- что оно собой представляет.

3.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты: 1С. Операции с элементами массива ячеек.

Сформировать массив ячеек А, рассмотренный в разд. 3.1.4, и привести пример арифметического выражения с элементами данного массива типа double.

2С. Операции с матрицами целого типа.

Привести пример выражения с матрицами целого типа.

3С. Операции с матрицами логического типа.

Привести пример логического выражения, в котором все переменные — матрицы.

4С. Операции с матрицами символьного типа.

Сформировать матрицу символьного типа размера 3×3 посредством преобразования числовой матрицы типа double.

5С. Операции с массивом записей.

Привести пример массива записей для описания трех объектов двумя параметрами, один из которых представлен вектором, а другой — матрицей.

3.5. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. К какому типу относятся числовые массивы по умолчанию?
- 2. Как определить тип массива?
- 3. Какие типы числовых массивов используются в MATLAB?
- 4. Как преобразовать матрицу типа double в матрицы целых чисел разрядности 8, 16, 32 и 64 со знаком и без знака?
 - 5. Какие операции возможны с матрицами числового целого типа?
 - 6. Как преобразовать числовую матрицу в матрицу логического типа?
 - 7. Что собой представляет матрица логического типа?
 - 8. Какие типы нечисловых массивов предусмотрены в MATLAB?
 - 9. Что собой представляет матрица символьного типа?
 - 10. Что собой представляет массив записей?
- 11. В каких случаях целесообразно создавать массив записей (структуру)?
 - 12. Что собой представляет матрица ячеек?
 - 13. В каких случаях целесообразно создавать матрицу ячеек?
- 14. С какой целью выводится графическое представление матрицы ячеек?

4. Средства графики

Цель работы: изучить графический инструментарий MATLAB и овладеть навыками построения двумерных и трехмерных графиков.

4.1. Краткая теоретическая справка

Графический инструментарий МАТLAB для построения и оформления двумерных и трехмерных графиков имеет свою специфику. Однако ряд следующих типовых положений является для них общим.

• Текущий график выводится в текущее графическое окно Figure, первый — в окно Figure 1. По умолчанию новый график выводится в то же окно, при этом предыдущий график автоматически удаляется.

• Вывод графиков в отдельных графических окнах с автоматически присваемыми номерами Figure 1, Figure 2, ... выполняется с помощью функции (без аргумента):

figure

которая ставится перед новой функцией построения графика.

• Вывод графика в отдельном графическом окне, имя которого присваивается пользователем, выполняется с помощью функции:

figure('Name','<Имяграфика>','NumberTitle','off')

• Вывод в текущее графическое окно **Figure** нескольких графиков на одних координатных осях выполняется по команде:

hold on

которая ставится перед новой функцией построения графика.

• Удаление из текущего графического окна **Figure** всех предыдущих графиков перед выводом нового графика выполняется по команде:

hold off

• Разбиение текущего графического окна **Figure** на отдельные поля для вывода независимых графиков выполняется с помощью функции:

subplot(m,n,p)

где m×n — размер матрицы графического окна: т строк и n столбцов; р — порядковый номер поля выводимого графика, считая по строкам слева направо.

Функция построения графика ставится после функции subplot.

• Средства оформления графиков, представленные в виде функций MATLAB (табл. 4.1), ставятся после функции построения графика. Во избежание ошибок <_{текст}> рекомендуется вводить латинскими буквами.

Функция	Назначение
grid	Нанесение координатной сетки с автоматическим выбором шага
title('<текст>')	Заголовок графика
xlabel('<текст>') ylabel('<текст>') zlabel('<текст>')	Обозначение осей графика x, y, z
xlim([xmin xmax]) ylim([ymin ymax]) zlim([zmin zmax])	Установка границ (двухэлементным вектором) по осям x, y, z при выводе графика
legend('legend1','legend2',)	Размещение легенды на автоматически выбираемом месте. При выводе нескольких графиков на одних осях их легенда отображается в порядке вывода графиков

Таблица 4.1. Функции оформления графиков

Двумерные графики

Система MATLAB предлагает большое разнообразие стандартных функций для построения двумерных графиков.

Полный список функций, используемых в двумерной графике, выводится по команде:

help graph2d

Основные из них с наиболее распространенными форматами приведены в табл. 4.2.

Управление свойствами двумерных графиков

Свойствами графика можно управлять с помощью <параметров управления> (см. табл. 4.2), которые условно можно разделить на две группы:

- LineSpec свойства без стандартных имен;
- PropertyName свойства со стандартными именами.

Таблица 4.2. Функции построения двумерных графиков

Имя функции	и Назначение и формат		
plot	Графики в линейном масштабе с линейной интерполяцией между соседними значениями: plot(x,y[,<параметры управления>]) где х, у — аргумент и функция (векторы или матрицы), согласованные по длине; <параметры управления> — необязательные параметры, управляющие свойствами графика (см. разд. 4.2.2). Квадратные скобки используются для условного обозначения		
semilogx	 неооязательных параметров Графики в логарифмическом масштабе по оси абсцисс и линейном — по оси ординат. Формат подобен функции plot. Диапазон по оси абсцисс в логарифмическом масштабе можно задавать с помощью функции: logspace(d1,d2[,n]) где d1, d2 — начальное 10^{d1} и конечное 10^{d2} значения диапазона; п — коли- чество точек в логарифмическом масштабе, по умолчанию равно 50 		
semilogy	Графики в линейном масштабе по оси абсцисс и логарифмическом — по оси ординат. Формат подобен функции plot		
loglog	Графики в логарифмическом масштабе по осям абсцисс и ординат. Формат подобен функции plot		
stem	Графики последовательностей чисел: stem(x,y,'fill'[,<параметры управления>]) где 'fill' — необязательный параметр, указывающий на закрашивание маркеров. Остальные входные параметры определяются как для функции plot		

hist	Гистограммы: hist(y,x)
	где у, х — векторы одинаковой длины; гистограмма отображает
	число попаданий значений элементов вектора у в интервалы, центры
	которых заданы элементами вектора х.
	В отсутствии вектора х для значений элементов вектора у по
	умолчанию выбирается 10 интервалов, и гистограмма отображает
	число попаданий значений элементов вектора у в центры данных
	интервалов.
	Цвет столбцов выбирается с помощью функции colormap (см. разд.
	4.1.4)

Параметры группы LineSpec определяют тип и цвет линии графика, а также вид маркеров. Значения параметров данной группы представлены в табл. 4.3. В функциях построения графиков значения параметров указываются в апострофах без разделяющих символов в произвольном порядке. Например: stem(x,y,'-ms')

Если параметры не указаны, то они выбираются автоматически.

Таблица 4.3	. Параметры группы	LineSpec

Тип линии		Цвет линии		Вид маркера	
или маркера		окера			
символ	линия	символ	цвет	символ	маркер
-	solid (непрерывная)	У	yellow (желтый)	•	point (точка)
:	dotted (пунктир, короткий штрих)	m	magenta (фиолетовый)	0	circle (кружок)
	dashdot (штрихпунктир)	c	суап (голубой)	X	x-mark (крестик)
	dashed (пунктир, длинный штрих)	r	red (красный)	+	plus (плюс)
		g	green (зеленый)	*	star (звездочка)
		b	blue (синий)	S	square (квадрат)
		w	white (белый)		
		k	black (черный)		

Параметры группы PropertyName представлены четырьмя разновидностями со следующими стандартными именами, задаваемыми в апострофах:

SclineWidth — толщина линии в пунктах (1 пункт = 1/75 дюйма $\approx 0,34$ мм), задаваемая цифрой без апострофов, по умолчанию равна 0,5;

S MarkerEdgeColor — цвет маркера, задаваемый значением соответствующего параметра из табл. 4.3 в апострофах;

SMarkerFaceColor — цвет закрашивания маркера (для замкнутых маркеров типа кружок, квадрат и т. п.), задаваемый значением соответствующего параметра из табл. 4.3 в апострофах;

«MarkerSize — размер маркера в пунктах, задаваемый цифрой без апострофов, по умолчанию равен 7.

Например:

stem(x,y,'MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','g','MarkerFaceColor',...

'r','LineWidth',1)

4.1.3. Трехмерные графики

Трехмерная графика предназначена для построения в трехмерном пространстве графиков функций двух переменных (двух аргументов) *z*(*x*, *y*).

Построение трехмерных графиков начинается с формирования сетки на плоскости xOy с помощью вспомогательных матриц X и Y по известным векторам x и y соответственно, где X — матрица, строки которой — копии вектора x, а Y — матрица, столбцы которой — копии вектора y. Матрицы X и Y должны иметь одинаковые размеры: количество строк каждой из них равно длине вектора y, а столбцов — длине вектора x.

Матрицы Х и У формируются с помощью функции:

[X,Y] = meshgrid(x,y)

Если векторы х и у одинаковы, то допускается короткий формат:

[X,Y] = meshgrid(x)

Полный список функций, используемых в трехмерной графике, выводится по команде: help graph3d

Основные из них с наиболее распространенными форматами приведены в табл. 4.4.

Имя функции	Назначение и формат
plot3	Трехмерные графики в виде двумерных линий: plot3(X,Y,Z[,<параметры управления>]) где X, Y — матрицы, формирующие сетку на плоскости хОу с помощью функции meshgrid; Z — функция (вектор или матрица); <параметры управления> — необязательные параметры, управляющие свойствами графика (см. разд. 4.1.4). Квадратные скобки используются для условного обозначения

Таблица 4.4. Функции построения трехмерных графиков

	необязательных параметров
mesh	Трехмерные сетчатые графики (с автоматическим нанесением координатных сеток). Формат подобен функции plot3
surf	Трехмерные сетчатые графики с окрашиванием поверхности (с автоматическим нанесением координатных сеток). Формат подобен функции plot3

Пример формирования матриц **X** и **Y** для сетки на плоскости хОу и построения трехмерных графиков с помощью функций mesh и plot3:

>> [X,Y] = meshgrid(-5:0.25:5);

>> $Z = X.^{2}+Y.^{2};$

>> mesh(X,Y,Z)

>> figure

>> plot3(X,Y,Z),grid

4.1.4. Управление свойствами трехмерных графиков

Свойствами трехмерного графика можно управлять с помощью <_{параметров} управления>(см. табл. 4.4), рассмотренных в разд. 4.1.2. Для управления свойствами трехмерных графиков предусмотрен ряд дополнительных средств, из которых выделим следующие два:

выбор палитры цветов;

Палитра цветов задается с помощью функции: colormap('<символическое имя палитры>')

Символические имена основных палитр представлены в табл. 4.5; по умолчанию установлена палитра hsv.

Функция colormap может стоять до или после функции построения графика.

Восстановление палитры hsv выполняется с помощью функции: colormap('default')

 вывод на поле графика шкалы цветов, устанавливающей соответствие со значениями функции, выполняется по команде: colorbar которая обязательно ставится последней.

Таблица 4.5. Стандартные палитры

Символическое имя	Палитра
bone	Серо-синяя
cool	Фиолетово-голубая
copper	Оттенки меди

flag	Чередование: красный, белый, синий, черный
gray	Оттенки серого
hot	Чередование: черный, красный, желтый, белый
hsv	Радуга
jet	Разновидность hsv
pink	Розовая
colorcube	Расширенная палитра hsv
autumn	Красно-желтая
spring	Желто-фиолетовая

Таблица 4.5 (окончание)

Символическое имя	Палитра
winter	Сине-зеленая
summer	Желто-зеленая
white	Белая (бесцветная)

4.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением инструментария MATLAB для построения, оформления и управления свойствами двумерных и трехмерных графиков.

4.3. Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Построение двумерного графика.

Для аргумента х, заданного на интервале

$$x \in [0; 8\pi]$$
 с шагом $\Delta x = \pi/8$ 4.1)

вычислить функцию

 $y = \sin x$

4.2)

и вывести ее график в линейном масштабе с линейной интерполяцией между соседними значениями.

Выполнить следующие действия по оформлению графика:

- нанести координатную сетку;
- обозначить ось абсцисс.

Пояснить:

- какая функция используется для вывода графика;
- в какое окно выводится график;

• какие функции используются для нанесения координатной сетки и обозначения оси абсцисс.

2. Построение нескольких двумерных графиков на одних координатных осях.

В том же окне вывести графики функций:

$$y_2 = \frac{\sin x}{x}; \tag{4.3}$$

$$y_3 = 0.5 \cos x,$$
 4.4)

для которых аргумент х задан на интервале (4.1).

При выводе графиков выбрать различный цвет линий для функций у₁, у₂ и

Выполнить следующие действия по оформлению графика:

обозначить ось ординат как axis y;

• ввести заголовок графика в виде Functions y1 y2 y3;

• разместить легенду для графиков функций: y1 — sin(x); y2 — sin(x)/x; y₃ — 0.5cos(x).

Пояснить:

y₃.

• какая команда обеспечивает вывод нескольких графиков на одних координатных осях;

какая функция используется для вывода графиков;

• сохраняется ли координатная сетка и обозначение оси абсцисс при выводе следующих графиков в то же окно;

• какие функции используются для обозначения оси ординат, вывода заголовка и размещения легенды.

3. Построение независимых графиков в одном окне с его разбиением на отдельные поля.

В графическом окне с именем Graph2D вывести друг под другом графики

функций у1 (4.2), у2 (4.3) и у3 (4.4).

Выполнить следующие действия по оформлению графиков:

- нанести координатную сетку;
- обозначить оси абсцисс и ординат;
- ввести заголовки графиков.

Пояснить:

• как создается окно с заданным именем;

• какая функция позволяет строить несколько независимых графиков в одном графическом окне.

4. Построение графика последовательности чисел.

В окне Sequence1 вывести график значений функции у2 (4.3) с нанесением координатной сетки и без закрашивания маркеров.

В новом окне Sequence2 вывести тот же график с нанесением координатной сетки, закрашиванием маркеров и следующей установкой параметров управ- ления:

- толщина линий равна 2;
- размер маркеров равен 6;
- цвет маркеров отличается от цвета линий;

• цвет закрашивания маркеров отличается от цветов линий и маркеров.

Пояснить:

• какая функция используется для вывода графика последовательности чисел;

• какой параметр этой функции отвечает за закрашивание маркеров;

• как устанавливаются параметры управления.

5. Построение графиков в полулогарифмическом и логарифмическом масштабах. По оси абсцисс х1 задать диапазон значений [1; 10⁴] с помощью функции logspace.

Вычислить функцию

$$y_4 = \sqrt{x}$$

4.5)

В окне Logarithmsaxes вывести друг под другом графики функции у4 (4.5) с нанесением координатной сетки и следующих масштабах по осям:

• логарифмическом — по оси абсцисс; линейном — по оси ординат;

• логарифмическом — по осям абсцисс и ординат.

Пояснить:

как диапазон значений задается с помощью функции logspace;

• какая функция используется для вывода графика в логарифмическом масштабе по оси абсцисс;

• какая функция используется для вывода графика в логарифмическом масштабе по осям абсцисс и ординат.

6. Построение гистограмм.

В окне **Histogram** вывести гистограмму нормального белого шума (см. табл. 2.1) — вектора у5 длиной 1000. Количество интервалов выбрать по умолчанию.

Пояснить:

• какая функция используется для построения гистограммы;

что отображает гистограмма;

• как гистограмма связана с плотностью вероятности нормального белого шума.

7. Построение трехмерного графика.

Для аргументов х и у, заданных на одинаковых интервалах:

 $x \in [-\pi; \pi]$ с шагом $\Delta x = \pi/32$,

 $y \in [-\pi; \pi]$ с шагом $\Delta y = \pi/32$,

вычислить функцию

$$z = \sin x + \cos y,$$

и в окне Graph3D вывести ее сетчатый график с автоматическим нанесением координатных сеток.

Выполнить следующие действия по оформлению графика:

• выбрать фиолетово-голубую палитру;

• обозначить оси x, y, z;

• вывести на поле графика шкалу цветов.

Пояснить:

• с чего начинается построение трехмерного графика; какая функция для этого используется;

• какая функция используется для вывода графика;

• какая функция используется для выбора палитры;

• какая команда используется для вывода шкалы цветов.

4.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты:

1С. Построение двумерного графика.

Для аргумента x, заданного на интервале $x \in [-2\pi; 2\pi]$, вывести график функции

$$y = x + \sin x,$$

с помощью функции plot, вывести заголовок и легенду, обозначить оси абсцисс и ординат.

2С. Построение двумерных графиков на одних координатных осях.

Для аргумента x, заданного на интервале $x \in [-2\pi; 2\pi]$, с помощью функции plot вывести графики функций, образующих систему уравнений:

$$\begin{cases} y = 5 \sin x; \\ y = 5x + 2. \end{cases}$$

Найти решение системы (приблизительное) по графику и проверить его методом подстановки в окне **Command Window.**

Для оформления графиков, включая вывод легенды, использовать программные средства.

3C. Построение двумерных графиков в одном графическом окне на отдельных полях

Для аргумента x, заданного на интервале $x \in [-2\pi; 2\pi]$, с помощью функции plot на отдельных полях вывести графики функций:

$$y_1 = \sin x;$$

 $y_2 = \sin |x|;$
 $y_3 = |\sin|x||.$

4С. Построение трехмерных графиков.

Привести примеры построения трехмерных графиков с помощью функций plot3, mesh и surf в отдельных графических окнах с оформлением, включая вывод шкалы цветов.

4.5. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, включая операции для вычисления функций и построения графиков, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

1. В какое графическое окно выводится график по умолчанию?

2. Как вывести график в новое графическое окно?

3. Как вывести несколько графиков на одних координатных осях?

4. Как удалить графики перед выводом нового графика в то же графическое окно?

5. Как вывести несколько независимых графиков в одном графическом окне с его разбиением на отдельные поля?

6. Какие средства оформления графиков используются в MATLAB?

7. Какие средства предусмотрены для установки типа, цвета и толщины линий?

8. Какие средства предусмотрены для установки вида, размера и цвета маркеров?

9. Какая функция используется для построения двумерных графиков в линейном масштабе с линейной интерполяцией между соседними значениями?

10. Какая функция используется для построения графика последовательности чисел?

11. Какие функции используются для построения графиков в полулогарифмическом и логарифмическом масштабах?

12. Какая функция используется для построения гистограмм?

13. В чем заключается подготовка перед построением трехмерного графика?

14. Какие функции используются для построения трехмерных графиков?

15. Как выбрать палитру цветов при построении трехмерного графика?

16. Как вывести шкалу цветов на поле трехмерного графика?

5. Режим программирования: script-файлы и function-файлы

Цель работы: изучить программные средства MATLAB и овладеть навыками создания файлов-сценариев (script-файлов) и внешних функций (function-файлов).

Краткая теоретическая справка

Режим программирования предназначен для создания программ пользователя в среде MATLAB.

Все программы пользователя, создаваемые в MATLAB, сохраняются на диске и имеют расширение m, поэтому их называют М-файлами.

Различают дее разновидности М-файлов:

Script-файл (файл-сценарий);

Sunction-файл (файл-функция).

В М-файлах, независимо от их вида, должны соблюдаться следующие правила языка MATLAB:

переменные не объявляются и не описываются;

Script-файлы

Script-файлом называют создаваемый пользователем М-файл, представляющий собой основную (управляющую) программу.

Термины "script-файл" и "программа" употребляют в тождественном смысле.

Программа состоит из операторов, записываемых построчно. По правилам хорошего стиля программирования рекомендуется:

\$>в начале программы ставить оператор-заголовок:

script

S во избежание конфликта переменных в Workspace и для очистки экрана, после заголовка разместить команды clc и clear.

Имя script-файла выбирается по тем же правилам, что и имя переменной (см. разд. 1.1.2).

Пример простейшего script-файла S1:

script clc

% Диапазон значений аргумента

x = 0:0.1:7;

% Вычисление значений синусоиды у

y = sin(x);

% Вычисление значений косинусоиды z

 $z = \cos(x);$

% Графики синусоиды у и косинусоиды z

subplot(2,1,1), plot(x,y,'--r'), grid

subplot(2,1,2), plot(x,z), grid

Обращение к script-файлу в режиме прямых вычислений осуществляется по его имени:

>> S1

После этого выполняются действия согласно программе с выводом результатов в окне **Command Window.**

Все переменные script-файла являются *глобальными*, т. е. они сохраняются в Workspace и доступны для использования в любых приложениях.

5.1.2. Function-файлы

Function-файлом называют создаваемый пользователем М-файл, представляющий собой внешнюю функцию (в отличие от встроенных функций MATLAB).

Термины "function-файл" и "внешняя функция" употребляют в тождественном смысле.

Описание function-файла начинается с оператора-заголовка function. Формат описания при нескольких выходных параметрах имеет вид:

function [Y1,Y2,...] = <имя функции>(X1,X2,...)

где <имя функции> — имя function-файла, выбираемое подобно имени переменной; X1, X2, ... — список формальных входных параметров; Y1, Y2, ... — список формальных выходных параметров.

При одном выходном параметре имеем короткий формат описания:

function Y = <имяфункции>(X1,X2,...)

После заголовка следует тело функции — записанная построчно на языке MATLAB программа определения выходных параметров Y1, Y2, ... по входным

X1, X2, ...

Пример function-файла F1:

function [z,p] = F1(x,y) % Вычисление суммы кубов z

 $z = x.^{3}+y.^{3};$

% Вычисление квадратного корня р

p = sqrt(abs(z));

Пример function-файла F2 с одним выходным параметром:

function z = F2(x,y)

% Вычисление суммы кубов z

 $z = x.^{3}+y.^{3};$

Обращение к внешней функции подобно обращению к встроенной функции MATLAB и при нескольких выходных параметрах имеет вид:

[Ү1факт, Ү2факт,...] = <имя функции>(Х1факт, Х2факт,...)

где Х1факт, Х2факт, ... — список фактических входных параметров;

Y1факт, Y2факт, ... — список фактических выходных параметров.

Фактические значения входных параметров Х1факт, Х2факт, ... должны быть определены перед обращением к внешней функции.

Примеры обращения к function-файлу F1 с несколькими выходными параметрами:

>> [d,c] = F1(2,3); >> a = 2; b = 3;

>> [d,c] = F1(a,b);

При одном выходном параметре допускается короткий формат обращения к внешней функции:

<имя функции>(Х1факт,Х2факт,...)

Примеры обращения к function-файлу F2 с одним выходным параметром: >> a = 2; b = 3;

>> d = F2(a,b) + sin(7+F2(5,7));

Разделение параметров function-файлов *на формальные* и *фактические* обусловлено тем, что *формальные* параметры являются *локальными*, т. е. они (вместе с внутренними переменными function-файла) загружаются в Workspace на время вычисления внешней функции и удаляются из Workspace по завершении вычислений. *Фактические* же параметры сохраняются в Workspace.

5.1.3. Оформление и вывод листинга М-файлов

При оформлении М-файлов рекомендуется соблюдать следующие правила:

% во избежание выводов нежелательных промежуточных результатов ставить точку с запятой.

Вывод листинга М-файла в окне Command Window выполняется по команде:

type <имя М-файла>

5.1.4. Ввод/вывод данных

Ввод данных с клавиатуры организуется с помощью функции:

<имя переменной> = input('<текст>');

приостанавливающей выполнение программы для ввода данных с клавиатуры; *точка с запятой* в конце функции input блокирует автоматический вывод вводимых данных. После ввода и нажатия клавиши <Enter> автоматически продолжается выполнение программы:

>> w0 = input('w0 = ');

w0 =

С клавиатуры следует ввести значение w0 и нажать клавишу <Enter>:

w0 = pi/16

Вывод данных в окно Command Window организуется следующим образом.

Вывод значений переменной или текста выполняется с помощью
 соответствующей функции:

disp(<имя переменной>)

или

disp('<текст>')

Для вывода значений нескольких переменных или текстов на одной строке их следует представить в виде вектора:

>> x = 5; a = 3; b = 10; >> disp([x a b]) 5 3 10 >> disp(['x 'a 'b']) x a b Вывод символьных переменных в виде слитного текста с игнорированием в них пробелов справа или с их учетом выполняется с помощью соответствующей функции:

```
strcat('<текст1>','<текст2>',...)
или
strcat(['<текст1>' '<текст2>',...])
Hапример:
>> strcat('hello ','goodbye')
ans = hellogoodbye
>> strcat(['hello ''goodbye'])
ans = hellogoodbye
```

Для вывода значения численной переменной одновременно с текстом удобно воспользоваться функцией num2str (см. разд. 3.1.2):

>>i = 5;

>>strcat([' Коэффициент ',num2str(i),'-го ВАРИАНТА'])

ans =

Коэффициент 5-го ВАРИАНТА

Вывод переменной ans можно блокировать с помощью функции disp: >>i = 5;

```
>>disp(strcat([' Коэффициент ',num2str(i),'-гоВАРИАНТА']))
```

Коэффициент 5-го ВАРИАНТА

Подобный вывод удобно организовать в теле цикла с изменяющейся переменной цикла, о чем пойдет речь далее в разд. 6.1.2.

Функцию strcat можно использовать для вывода значения численной переменной в заголовке графика (см. табл. 4.1):

>>N = 3;

```
>>title(strcat(['AmplitudeSpectrumN = ',num2str(N)]))
```

иливобозначенииосейграфика:

>> i = 7;

>> ylabel(strcat('S',num2str(i),'(f)'))

В М-файлах функция disp используется при выводе комментариев и сообщений:

>> disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')

% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

>> disp('% Вывод значения СКО')

% Вывод значения СКО

5.1.5. Пауза и досрочное прерывание программы

Приостановить процесс выполнения программы на неопределенное (до нажатия любой клавиши) время можно по команде:

pause

В режиме программирования команду pause необходимо ставить в тех случаях, когда в процессе выполнения программы последовательно выводятся разные графики в текущее графическое окно; в противном случае пользователю

окажется доступным только один, последний, график. Команда pause ставится перед выводом следующего графика.

В том случае, если пользователь не предполагает следить за выполнением программы, и его интересует только результат, можно выводить графики в разные графические окна по команде figure без пауз.

Командой pause удобно воспользоваться в script- или function-файле перед выводом результатов, которому предшествует сообщение:

V = var(randn(1,1000)); disp('% Для вывода ДИСПЕРСИИ ШУМА нажмите <ENTER>')

pause

disp([' V = 'num2str(V)])

в том числе при выводе графиков:

x = 0:pi/32:2*pi; y = sin(x);

disp('% Для вывода ГРАФИКА СИНУСОИДЫ нажмите <ENTER>') pause plot(x,y), grid

Досрочное прерывание процесса выполнения программы в результате проверки тех или иных условий выполняется по команде:

return

Рекомендуется предусмотреть вывод сообщения о причине досрочного прерывания.

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбинацию клавиш <Ctrl>+<Break>.

5.1.6. Создание и хранение М-файлов

Для создания М-файла и его сохранения в папке пользователя необходимо выполнить следующие действия:

1. В окне **MATLAB** выбрать в главном меню пункт **File** | **New** (Файл | Новый) и определить тип создаваемого М-файла.

2. В раскрывшемся окне Editor (Редактор) набрать текст М-файла построчно.

3. Для сохранения М-файла выбрать в главном меню команду File | Save as (Сохранить как).

4. В раскрывшемся окне **Save as** выбрать требуемую папку, присвоить имя новому М-файлу (без расширения) и нажать кнопку **Save** (Сохранить).

При открытом окне редактора после внесения изменений в М-файл необходимо его сохранить перед следующим запуском. Признаком несохраненного файла является символ "*" (звездочка) при его имени в окне редактора.

Создание новой папки выполняется с помощью контекстного меню в окне Current Folder.

Сохранение пути к требуемой папке выполняется по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders (Добавить путь | Выбранные папки). Сохранение пути к папке позволяет в текущей сессии запускать М-файл, не открывая данную папку.

При запуске М-файлов из текущей папки путь к ней можно не сохранять.

5.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением средств MATLAB для создания файловсценариев (script-файлов) и внешних функций (function-файлов).

5.3. Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу заключается в создании script- и function-файлов и их выполнении в режиме прямых вычислений и включает в себя следующие пункты:

1. Создание script-файла.

Создать script-файл, который начинается с оператора-заголовка, после чего выполняются следующие действия:

• очистка экрана;

• очистка Workspace;

• генерирование равномерного Y_uniform и нормального Y_normal белого шума длины N, равной 1000;

• вывод в графическом окне White Uniform Noise графика равномерного белого шума Y_uniform и гистограммы (друг под другом).

График шума вывести с помощью функции plot с нанесением координатной сетки и заголовком.

Гистограмму шума вывести с заголовком; количество интервалов выбрать по умолчанию;

• вывод в графическом окне White Normal Noise аналогичных графиков для нормального белого шума Y_normal.

Coxpaнить script-файл с именем Noise_1.

Запустить script-файл на выполнение.

Проверить содержимое Workspace после выполнения script-файла. Пояснить:

• что такое script-файл;

• в каком окне создается script-файл;

• какие команды используются для очистки экрана и Workspace;

- как выбирается имя script-файла;
- какое расширение имеют script-файлы;
- как сохранить script-файл;
- как обратиться к script-файлу в режиме прямых вычислений;

• где хранятся переменные script-файла в процессе и по завершении его выполнения.

2. Добавление паузы и сообщения о выводе результатов.

В созданный script-файл Noise_1 (см. п. 1) добавить:

строки с сообщением о выводе графиков с текстом:

Для вывода графика и гистограммы РАВНОМЕРНОГО БЕЛОГО ШУМА нажмите <ENTER> Для вывода графика и гистограммы НОРМАЛЬНОГО БЕЛОГО ШУМА нажмите <ENTER>

паузу перед выводом каждого из графиков.

Пояснить, какие средства МАТLАВ для этого используются.

Coxpaнить script-файл с именем Noise_2.

Запустить script-файл на выполнение.

3. Ввод данных с клавиатуры.

В созданном script-файле Noise_2 (см. п. 2) организовать ввод длины шума N с клавиатуры с сообщением о вводе.

Coxpaнить script-файл с именем Noise_3.

Запустить script-файл на выполнение.

Пояснить, как организуется ввод данных с клавиатуры.

4. Создание function-файла.

Создать function-файл mean_var для вычисления среднего значения MEAN и дисперсии VAR случайной последовательности Y.

В function-файл mean_var организовать вывод:

• символьной переменной 'Mean value = ' и численного значения переменной MEAN;

• символьной переменной 'Variance value = ' и численного значения переменной VAR.

Добавить в function-файл строки комментариев.

Вычислить среднее значение и дисперсию равномерного Y_uniform и нормального Y_normal белого шума длины 5000 с помощью созданного function-файла.

Проверить содержимое Workspace после выполнения function-файла. Пояснить:

• что такое function-файл;

- каков формат function-файла;
- назначение формальных и фактических параметров function-файла;
- в каком окне создается function-файл;
- как сохранить function-файл;
- какое расширение имеют function-файлы;
- как обратиться к function-файлу для его выполнения;

• где хранятся переменные function-файла в процессе и по завершении его выполнения.

5. Использование function-файла в script-файле.

На основе script-файла Noise_3 (см. п. 3) создать новый script-файл, в котором после вывода графиков вычислить среднее значение и дисперсию равномерного Y_uniform и нормального Y_normal белого шума с помощью внешней функции mean_var.

Добавить строки с сообщением о выводе результатов с текстом:

Вывод статистических характеристик РАВНОМЕРНОГО БЕЛОГО ШУМА

Вывод статистических характеристик НОРМАЛЬНОГО БЕЛОГО ШУМА Coxpaнutь script-файл с именем Noise в папке пользователя My_Folder. Запустить script-файл на выполнение.

Проверить содержимое Workspace после выполнения script-файла. Пояснить:

• как обратиться к function-файлу из script-файла;

• как сохранить путь к собственной папке перед запуском scriptфайла;

• какие переменные сохраняются в Workspace после выполнения script-файла.

5.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты:

1С. Создание script-файла.

Создать script-файл для решения СЛАУ

$$Ax = b. 5.1)$$

Организовать ввод с клавиатуры матрицы А и вектора b.

Значения элементов вектора х использовать в качестве коэффициентов a_i для вычисления значения многочлена

$$y = a_N x^N + a_{N-1} x^{N-1} + \dots + a_1 x + a_0$$
 5.2)

с помощью функции:

y = polyval(a,x)

где а — вектор коэффициентов многочлена (5.2) в порядке убывания степеней;

х и у — значения аргумента и многочлена (скаляры, векторы или матрицы).

Организовать ввод с клавиатуры значения (значений) аргумента х.

Перед вводом исходных данных и выводом результатов добавить строки соответствующих сообщений.

2C. Создание script-файла.

Создать script-файл для генерации "магической" матрицы М с помощью функции:

M = magic(n)

где n и M — порядок и имя матрицы.

Организовать ввод с клавиатуры порядка матрицы.

Вычислить определитель матрицы.

Вычислить суммы элементов столбцов, строк и главной диагонали матрицы.

Растянуть матрицу в вектор-столбец, выполнить сортировку его элементов по возрастанию и вычислить сумму элементов, деленную на порядок матрицы.

Перед вводом порядка матрицы и выводом результатов добавить строки соответствующих сообщений.

3C. Создание function-файла.

Создать function-файл для генерации двух матриц одинакового порядка:

• теплицевой матрицы **Т** с произвольными целыми значениями элементов первого столбца;

"магической" матрицы **М**.

В качестве входных параметров выбрать порядок матриц и элементы первого столбца теплицевой матрицы.

4С. Создание script-файла с использованием function-файла.

Создать script-файл для решения СЛАУ (5.1).

В качестве матрицы коэффициентов А использовать теплицеву матрицу **Т**, а свободных членов **b** — "магическую" матрицу **M**.

Для генерации матриц использовать function-файл, созданный в п. 3С.

Вычислить определитель матрицы коэффициентов.

Определить количество одновременно решаемых СЛАУ.

Перед выводом результатов добавить строки соответствующих сообщений.

5.5. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, включая листинги М-файлов (шрифт Courier New), результаты их выполнения, копируемые из окна **Command Window** (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде **Edit** | **Copy Figure** в окне **Figure**) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

При защите лабораторной работы набор контрольных вопросов формируется из следующего списка:

1. Для чего предназначен режим программирования?

2. Что такое М-файл?

3. Какие разновидности М-файлов создаются в режиме программирования?

4. Как вывести листинг М-файла?

5. Что такое script-файл и как к нему обратиться в режиме прямых вычислений?

6. Что такое function-файл и как к нему обратиться в режиме прямых вычислений и в script-файле?

7. Каков формат описания function-файла?

8. Какие переменные function-файла называют формальными и фактическими?

9. Какие переменные сохраняются в Workspace после выполнения script-файла?

10. Какие переменные сохраняются в Workspace после выполнения function-файла?

11. Какие переменные называют локальными и глобальными?

12. В каком окне создаются script- и function-файлы?

13. Как организовать ввод данных с клавиатуры в режиме программирования?

14. Как организовать вывод данных в окно Command Window в режиме программирования?

15. Как вывести на одной строке значение численной переменной одновременно с текстом?

16. В каких случаях целесообразно предусмотреть паузу?

17. Как сохранить М-файл в требуемой папке?

18. Как сохранить путь к данной папке?

6. Режим программирования: организация разветвлений и циклов

Цель работы: изучить средства организации разветвлений и циклов в MATLAB и овладеть навыками их использования при разработке М-файлов.

6.1. Краткая теоретическая справка

Для организации разветвлений и циклов в М-файлах используются операторы языка MATLAB, рассматриваемые в следующих разделах.

6.1.1. Операторы организации разветвлений

Имеются две основные разновидности разветвлений, реализуемые двумя операторами MATLAB.

if <условие>

<фрагмент>

end

где <фрагмент> — фрагмент программы.

Действие оператора: если значение <условия> истинно (выполняется), то управление передается <фрагменту>, в противном случае управление передается части программы, следующей за end.

Условие представляет собой логическое выражение — простое, с одной операцией отношения (см. табл. 1.7), или более сложное, включающее логические операции (см. табл. 1.8).

Пример использования оператора if с простым условием:

if i==ja(i,j) = 1;

end

и с более сложным условием:

```
if (i==j)&((i+j)>50)
a(i,j) = 10;
end
Pacширенный формат оператора if с одним условием имеет вид:
if <ycловиe><фpaгмент1>
else
<фpaгмент2>
end
Действие оператора: если значение <ycловия> истинно, то управление
```

ценствие оператора. если значение <условия> истинно, то управление передается <фрагменту1>, если значение <условия> ложно, то выполняется <фрагмент2>; после этого управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора іf расширенного формата:

```
if i==j

a(i,j) = 1;

else

a(i,j) = -1;

end

Формат оператора if с несколькими условиями имеет вид:

if <ycловиe1><фрагмент1>

elseif <ycловиe2><фрагмент2> ...

elseif <ycловиeN-1><фрагментN-1> ...

else

<фрагментN>

end
```

Действие оператора: если значение <условия1> истинно, то управление передается <фрагменту1>, если значение <условия2> истинно, то управление передается <фрагменту2> и т. д. вплоть до <условияN-1>; если значения всех условий ложно, то управление передается <фрагментуN>; после этого оно передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора if с несколькими условиями:

if i > j a(i,j) = 1; else if i = j a(i,j) = -1; else a(i,j) = 0; end

Вазветвление в зависимости от значения выражения (арифметического, символьного или логического) выполняется с помощью оператора switch следующего формата:

```
switch <выражение>
case <значение1><фрагмент1>
case <значение2><фрагмент2>
...
otherwise
<фрагментN>
end
```

Действие оператора: в зависимости от значения <выражения> управление передается соответствующему <фрагменту>; если значение выражения не равно ни одному из указанных, то управление передается <фрагментуN> (который может отсутствовать); после этого управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора switch:

x = [pi/6 pi/8 pi/16]; a = input('a = '); b = input('b = ');switch (a+b) case 0 y = sin(x);case 1 y = cos(x);otherwise y = tan(x)end

6.1.2. Операторы организации циклов

Имеются две основные разновидности циклов, реализуемые двумя операторами MATLAB.

\$ Арифметический цикл с заранее известным (фиксированным) числом повторений организуется с помощью оператора for одного из следующих форматов:

с простой переменной цикла:

for <переменная> = <нач.значение>:[<шаг>:]<кон.значение>

<тело цикла>

end

где <переменная> — имя простой переменной цикла; <нач.значение>, <кон.значение>, <шаг> — соответственно начальное и конечное значения переменной цикла и шаг ее изменения; если шаг равен 1, то его можно не указывать; <тело цикла> — повторяющийся фрагмент программы.

Действие оператора: при изменении значений <переменной> от

<нач.значения> до <кон.значения> с заданным <шагом> повторяется
<тело цикла>, каждый раз с новым значением <переменной>; после этого управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора for с простой переменной цикла (полужирным шрифтом выделены элементы, вычисляемые в цикле):

 $x = [2 \ 3 \ 5];$ for i = 1:3 x(i) = i^2 end x = 1 3 5 x = 1 4 5 x = 1 4 9 • с переменной цикла — вектором: for <переменная> = <вектор> <тело цикла> end

Действие оператора: при изменении значений <переменной>, которой последовательно присваиваются значения элементов <вектора>,повторяется <тело цикла>, каждый раз с новым значением <переменной>; после этого управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора for с переменной цикла — вектором:

 $a = [-1 \ 0 \ 15];$ for i = a x = i+a end x = -2 -1 14 x = -1 0 15 x = 14 15 30

S с переменной цикла — матрицей: for <переменная> = <матрица> <тело цикла> end

Действие оператора: при изменении значений <переменной>, которой последовательно присваиваются значения столбцов <матрицы>,повторяется <тело цикла>, каждый раз с новым значением <переменной>; после этого управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора for с переменной цикла — матрицей:

```
x = [1 \ 2 \ 3;4 \ 5 \ 6;7 \ 8 \ 9];
for i = a
x = 1'
end
x =
1 \ 4 \ 7
x =
2 \ 5 \ 8
x =
```

3 6 9

У Итерационный цикл с заранее неизвестным (не фиксированным) числом повторений организуется с помощью оператора while следующего формата:

while <условие> <тело цикла> end

где <условие> — логическое выражение, в котором хотя бы одна из переменных встречается в <теле цикла>.

Действие оператора: <тело цикла> повторяется до тех пор, пока <условие> истинно, после чего управление передается части программы, следующей за end.

Пример использования оператора while для вычисления суммы геометрической прогрессии

$$s = \sum_{n=0}^{\infty} (-0,5)^n$$

с точностью до $\varepsilon = 10^{-4}(e)$ выводом после выхода из цикла значения суммы и погрешности ее вычисления (вектор [s e]):

$$n = 0; s0 = 0; e = 100;$$

while $e > 1e-4$
 $s = s0+(-0.5).^n;$
 $e = abs(s-s0);$
 $s0 = s;$
 $n = n+1;$
end [s e]
 $ans =$
 $0.6667 - 0.0001$

Принудительный выход из цикла for или while peanusyercs оператором: break

после которого управление передается части программы, следующей за end.

6.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с изучением средств MATLAB для организации разветвлений и циклов при разработке script-файлов и functionфайлов.

6.3. Задание на лабораторную работу

Задание на лабораторную работу включает в себя следующие пункты:

1. Организация разветвлений с одним условием.

Создать function-файл у1 для вычисления функции

 $y_1(x) = \begin{cases} a \sin bx, \text{ если } a \neq 0 \text{ и } b \neq 0; \end{cases}$

$$(a+2)x + b$$
, иначе, 6.

где аргумент х задан на интервале $x \in [-4; 4]$ с шагом $\Delta x = 0,1;$ а, b —

1)

произвольные вещественные константы (скаляры).

Вывести график функции $y_1(x)$.

Обратиться к function-файлу у1 в режиме прямых вычислений для проверки разветвления по условию в (6.1).

Пояснить:

какой оператор использован для организации разветвления;

• какие параметры function-файла у1 являются входными и выходными.

2. Организация разветвлений с несколькими условиями.

Создать function-файл у2 для вычисления функции

$$y_2(x) = \begin{cases} a \sin bx, \text{ если } a \neq 0 \text{ и } b \neq 0; \\ (a+2)x + b, \text{ если } a > -2 \text{ и } b > 0; \\ (2-a)x^2 + b, \text{ иначе,} \end{cases}$$
 6.2)

где аргумент х и скаляры а и в определены в п. 1.

Вывести график функции $y_2(x)$.

Обратиться к function-файлу у2 в режиме прямых вычислений для проверки разветвления по условиям в (6.2).

Пояснить, какой оператор использован для организации разветвления.

3. Организация цикла с заранее известным числом повторений.

Создать function-файл Fibonacci для формирования ряда Фибоначчи — вектора F из M членов, где каждый следующий член равен сумме двух предыдущих:

$$F_i = F_{i-1} + F_{i-2} = 3, 4, \dots, M$$

$$(6.3)$$

Задать начальные значения $F_1 = 0$ и $F_2 = 1$.

Обратиться к function-файлу Fibonacci в режиме прямых вычислений для вывода ряда Фибоначчи.

Пояснить:

какой оператор использован для организации цикла;

• какие параметры function-файла Fibonacci являются входными и выходными.

4. Организация цикла с заранее неизвестным числом повторений.

Создать function-файл GeomProgression для вычисления в цикле суммы бесконечной геометрической прогрессии:

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} q^n \tag{6.4}$$

с заданной точностью є и значением q, при котором выполняется условие абсолютной сходимости ряда.

После выхода из цикла вычислить точное значение суммы (6.4) по формуле:

$$S_{true} = \frac{1}{1-q}$$

и погрешность вычисления суммы:

$$\Delta S = |S - S_{true}|$$

Вывести значения S, S_{true} , ε и ΔS .

Обратиться к function-файлу GeomProgression в режиме прямых вычислений для вывода требуемых значений.

Пояснить:

• какой оператор использован для организации цикла;

• какие параметры function-файла GeomProgression являются входными и выходными;

• как сопоставить выведенные значения.

5. Организация разветвления в зависимости от значения выражения.

Создать script-файл DifferentFunctions для выполнения одного из functionфайлов: y1, y2, Fibonacci или GeomProgression, в зависимости от значения переменной variant.

В script-файле организовать:

• вывод сообщения о соответствии значения переменной variant functionфайлу;

• ввод значения переменной variant с клавиатуры;

• разветвление в зависимости от значения переменной variant с выводом сообщения об исполняемом function-файле;

• вывод сообщения для непредусмотренного значения переменной variant, не соответствующего ни одному из function-файлов.

Обратиться к script-файлу DifferentFunctions в режиме прямых вычислений для проверки требуемого разветвления.

Пояснить:

• какой оператор использован для организации разветвления;

• что проверяется при организации разветвления;

• к какому типу данных может принадлежать переменная variant.

6.4. Задание на самостоятельную работу

Самостоятельное задание рекомендуется для закрепления полученных знаний и включает в себя следующие пункты: 1С. Организация разветвления по условию.

Создать function-файл для решения квадратного уравнения

 $ax^2 + bx + c = 0$

двумя способами:

используя известную алгебраическую формулу;

• с помощью функции вычисления корней многочлена производного порядка:

$$x = roots(a)$$

где а — вектор коэффициентов в порядке убывания степеней, х — корни многочлена (вектор).

В том случае, если корни оказались комплексно сопряженными, вычислить и вывести их модуль и аргументы.

2С. Организация разветвления в зависимости от значения выражения.

Создать function-файл для вычисления значения одной из следующих функций:

$$y(x) = \begin{cases} ax - b, & (a + b) = 0.8; \\ ax^2 + b, & (a + b) = 2.5; \\ \sin bx - a, & (a + b) = -3.4; \\ \cos ax + b, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Построить график функции у(х) на выбранном интервале по оси х с помощью функции plot.

Обратиться к function-файлу в режиме прямых вычислений, задавая значения а и b, при которых будут выведены графики различных функций.

3С. Организация цикла с заранее известным числом повторений.

Создать function-файл для вычисления суммы конечного ряда при

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(-1)^n \sqrt{(n+1)x}}{n+1}$$

4С. Организация цикла с заранее неизвестным числом повторений.

Создать function-файл для вычисления суммы бесконечного ряда с заданной точностью є при 0 < |x| < 1

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \sqrt{(n+1)x}}{n+1}$$

Определить количество циклов, требуемое для вычисления суммы при заданной точности.

6.5. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит результаты выполнения каждого пункта задания, включая листинги М-файлов (шрифт Courier New), результаты их выполнения, копируемые из окна **Command Window** (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Поясните назначение и формат оператора if.
- 2. Поясните назначение и формат оператора switch.
- 3. Поясните назначение и формат оператора for.
- 4. Поясните назначение и формат оператора while.

5. Как выполнить принудительный выход из цикла? Какой части программы передается управление в этом случае?

Лабораторная работа №2. Дискретные сигналы

Цель работы: изучить математическое описание дискретных сигналов и овладеть программными средствами их моделирования в MATLAB.

7.1. Краткая теоретическая справка

В теории ЦОС принято разделять операции дискретизации по времени и квантования по уровню. Полагая операцию квантования отсутствующей, изучают дискретные сигналы и линейные дискретные системы (ЛДС), а затем, отдельно, — эффекты нелинейной операции квантования.

Дискретным называют сигнал, дискретный по времени и непрерывный по состоянию (уровню), который описывается последовательностью чисел бесконечной разрядности x(nT) или x(n), называемой коротко последовательностью. Значения nT, n = 0,1, ..., называют дискретным временем, где T — период дискретизации, а n — дискретным нормированным временем.

В теории ЦОС термины "*дискретный сигнал*" и "*последовательность*" употребляют в тождественном смысле.

Цифровым называют сигнал, дискретный по времени и квантованный по состоянию (уровню), который описывается последовательностью чисел конечной разрядности — квантованной последовательностью x(nT) или x(n).

При компьютерном моделировании под дискретным сигналом условно понимают последовательность чисел *максимально возможной* разрядности, а под цифровым — последовательность чисел *заданной* разрядности.

В MATLAB числа с максимальной разрядностью относятся к типу double¹, который выбирается по умолчанию (см. табл. 3.1).

7.1.1. Детерминированные дискретные сигналы

Детерминированным дискретным сигналом называют сигнал, значения которого в любой момент времени n (или nT) заранее известны или могут быть определены точно по заданной математической модели.

Детерминированный дискретный сигнал описывается последовательностью x(nT) или x(n) , при этом термин "детерминированный" принято опускать.

Для детерминированного дискретного сигнала (последовательности) представляют интерес такие его характеристики, как среднее значение, энергия, средняя мощность, автокорреляционная и автоковариационная функции.

Средним значением последовательности называют сумму ее значений, отнесенную к длине.

Энергией последовательности называют сумму квадратов ее значений, а средней мощностью — энергию, отнесенную к длине последовательности.

¹ С плавающей точкой двойной точности (double-precision floating point).

В МАТLАВ среднее значение М вычисляется с помощью функции:

$$M = mean(x)$$

где х — вектор отсчетов последовательности.

Энергия E и средняя мощность P вычисляются согласно их определению: $E = sum(x.^2)$

$P = sum(x.^2)/length(x)$

где length(x) — длина последовательности.

Автокорреляционная функция (АК Φ^1) $R_x(m)$ последовательности длины N позволяет оценить зависимость между ее отсчетами при различных сдвигах по времени m :

$$R_{x}(m) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{n=0\\\leq (N-1)}}^{N-|m|-1} x(n)x(n+m), -(N-1) \leq m$$
(7)

Автоковариационная функция $r_x(m)$ позволяет оценить зависимость между отклонениями отсчетов последовательности от среднего значения μ_x при различных сдвигах по времени m:

$$r_{x}(m) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{n=0\\\leq m \leq (N-1)}}^{N-|m|-1} [x(n) - \mu_{x}][x(n+m) - \mu_{x}], -(N-1)$$
(7.2)

Согласно определению, $R_x(m)$ (7.1) и г (m_x) (7.2) являются четными функциями длины L = 2N - 1, центрированными относительно m=0:

$$R_x(m) = R_x(-m);$$
$$r_x(m) = r_x(-m).$$

При этом в точке m=0 имеем:

$$R_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) = P_{\text{cp } x} = \sigma_x^2 + \mu_x^2;$$
 7.3)

$$r_x(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - \mu_x]^2 = \sigma_x^2;$$
 7.4)

где $P_{cp x}$ и σ_x^2 — средняя мощность и дисперсия последовательности x n().

Очевидно, что при $\mu_x = 0$ получаем равенства:

¹ В англоязычной литературе — аббревиатура ACF (Autocorrelation Function).
$$R_{\chi}(m) = r_{\chi}(m);$$

$$R_{\chi}(0) = r_{\chi}(0) = \sigma_{\chi}^{2}.$$

В МАТLAВ АКФ и автоковариационная функция рассчитываются с помощью функций (без учета множителя 1/N):

$$R = xcorr(x)$$
$$r = xcov(x)$$

где х — вектор отсчетов исходной последовательности длины N; R и r — векторы длины L = 2N - 1 значений АКФ $R_x(m)$ и автоковариационной функции $r_x(m)$, соответственно, центрированных относительно m=N:

$$R_{\chi}(N+m) = R_{\chi}(N-m), m = 1, 2, ..., N-1;$$
(7.5)

$$r_x(N+m) = r_x(N-m), m = 1, 2, \dots, N-1.$$
7.6)

При этом в точке m=N имеем

$$R_x(N) = P_{\text{cp}\,x} = \sigma_x^2 + \mu_x^2;$$
 (7.7)

$$r_x(N) = \sigma_x^2 \tag{7.8}$$

Для вывода графика АКФ, центрированного относительно $m^{=}0$, следует выбрать интервал $m \in [-(N-1); (N-1)].$

7.1.2. Случайные дискретные сигналы

Случайным (стохастическим) дискретным сигналом называют сигнал, значения которого в дискретные моменты времени n (или nT) заранее неизвестны и могут быть определены лишь с некоторой вероятностью.

Случайный дискретный сигнал описывается совокупностью случайных последовательностей $x_k(n)$, k=1, 2,..., K, n=0,1,..., (N-1), и закономерностями, характеризующими свойства совокупности.

Описание случайного дискретного сигнала удобно представить в виде матрицы **X** :

$$X = \begin{cases} x_1(0) & x_1(1) & \cdots & x_1(n) & \cdots & x_1(N-1) \\ x_2(0) & x_2(1) & \cdots & x_2(n) & \cdots & x_2(N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_K(0) & x_K(1) & \cdots & x_K(n) & \cdots & x_K(N-1) \end{cases}$$

Ансамблем реализаций называют совокупность случайных последовательностей $x_k(n)$ (строки матрицы **X**), а реализацией — одну из последовательностей.

Любая реализация случайного сигнала представляет собой детерминированный сигнал.

В большинстве случаев в качестве закономерностей, характеризующих свойства дискретного случайного сигнала **X**, ограничиваются одномерной и двумерной плотностями вероятности.

Одномерная плотность вероятности случайного дискретного сигнала p(x,n), где х — значения случайного сигнала **X** в моменты времени n, позволяет посредст-

вом статистического усреднения ¹ при достаточно большом К (теоретически К→∞) определить следующие статистические характеристики случайного дискретного сигнала:

 \mathfrak{S} математическое ожидание $\mu_x(n)$ — средние значения элементов столбца в моменты времени n, n=0,1,..., (N-1);

Вдисперсию $\sigma_x^2(n)$ — средние значения квадратов разностей между элементами столбца и его средним значением $\mu_X(n)$ в моменты времени n, n=0,1,..., (N-1).

Двумерная плотность вероятности случайного дискретного сигнала $p(x_1, x_2, m, n)$, где x_1, x_2 — значения сигнала X в моменты времени m и n, позволяет посредством статистического усреднения определить дополнительные статистические характеристики случайного дискретного сигнала:

 $AK\Phi R_x(m,n)$ — АКФ (7.1), где последовательности x(n) соответствует усредненная по ансамблю последовательность $\mu_X(n)$, n=0,1,..., (N-1);

 \mathfrak{S} автоковариационную функцию $r_X(m, n)$ — автоковариационная функция (7.2), где значению μ_X соответствует среднее значение $\mu_X(n)$ — константа.

Случайный дискретный сигнал X называют стационарным в широком смысле (стационарным по Хинчину), если его одномерная плотность вероятности не зависит от времени n, а двумерная — зависит только от сдвига по времени m.

Случайный дискретный сигнал X называют стационарным в узком смысле (строго стационарным), если сказанное справедливо для его любой п-мерной плотности вероятности [2].

Таким образом, сигнал, стационарный в узком смысле, всегда стационарен в широком смысле, но не наоборот.

По умолчанию под *стационарностью* случайного дискретного сигнала будем подразумевать его стационарность в широком смысле.

Следствием *стационарности* случайного дискретного сигнала будет *независимость от времени* n его статистических характеристик: математического ожидания μ_X и дисперсии σ_X^2 . При этом АКФ $R_X(m)$ и

¹ Под статистическим усреднением понимают усреднение по ансамблю реализаций в фиксированный момент времени n.

автоковариационная функция $r_X(m)$ будут зависеть только от сдвига по времени m.

Иными словами, статистические характеристики стационарного случайного дискретного сигнала обладают свойством инвариантности ¹ во времени.

Соответственно, статистические характеристики нестационарного случайного дискретного сигнала будут зависеть от времени n (не обладают свойством инвариантности во времени).

В теории ЦОС понятие ансамбля реализаций широко используется как удобная математическая концепция при выводе многих соотношений. Однако на практике при обработке сигналов, как правило, доступна для наблюдения лишь одна реализация случайного дискретного сигнала.

Стационарный случайный дискретный сигнал называется эргодическим, если при определении его статистических характеристик усреднение по ансамблю реализаций эквивалентно усреднению по времени одной реализации, теоретически бесконечной длины N→∞.

Эргодический случайный дискретный сигнал — случайная последовательность x(n) — описывается математическим ожиданием (средним значением) μ_X , дисперсией σ_X^2 , АКФ $R_x(m)$ и автоковариационной функцией $r_x(m)$. С их определением при N $\rightarrow\infty$ можно познакомиться в [2—3].

При конечной длине N последовательности говорят о вычислении их оценок:

$$\mu_x^{\hat{}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n);$$

$$\hat{\sigma}_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) - \hat{\mu}_x]^2;$$

Оценки АКФ $\hat{R}_x(m)$ и автоковариационной функции $r_x(m)$ получают соответственно по формулам (7.1) и (7.2).

Очевидно, что статистические характеристики эргодического случайного дискретного сигнала, по определению стационарного, обладают свойством инвариантности во времени.

При обработке случайного сигнала в реальном времени его статистическая модель² может быть заранее не определена. В этом случае принято говорить о текущих оценках статистических характеристик $\mu_x(n)$, $\sigma_x^2(n)$, $R_x(m,n)$, $r_x(m,n)$ на интервале [0;*n*].

Далее по умолчанию будем подразумевать эргодические случайные дискретные сигналы.

¹ Неизменности.

² Стационарность/нестационарность, статистические характеристики.

В MATLAB для вычисления оценок математического ожидания М и дисперсии D используются функции:

M = mean(x)

 $\mathbf{D} = \mathbf{var}(\mathbf{x})$

где х — вектор отсчетов исходной последовательности длины N.

При моделировании методов и алгоритмов ЦОС часто используют случайные последовательности в виде белого шума. Две его широко применяемые разновидности генерируются в MATLAB (см. табл. 2.1):

x = rand(1,N)

где х — вектор-строка отсчетов случайной последовательности длины N.

Автоковариационная функция данного равномерного белого шума при N→∞ имеет вид *цифрового единичного импульса*;

 $\$ нормальный белый шум — последовательность случайных чисел, распреде- ленных по нормальному закону (математическое ожидание — 0 и диспер- сия — 1) — с помощью функции: **x** = randn(1,N)

АКФ данного нормального белого шума при N $\rightarrow \infty$ имеет вид *цифрового* единичного импульса.

Для моделирования нормального белого шума с заданными математическим ожиданием (средним значением) и дисперсией воспользуемся свойствами дисперсии D{ }X и математического ожидания M {X} случайной величины X :

$$\begin{split} M\{X+C\} &= M\{X\} + C;\\ D\{X+C\} &= D\{X\} + D\{C\} = D\{X\};\\ M\{BX\} &= BM\{X\};\\ D\{BX\} &= B^2 D\{X\}, \end{split}$$

где С, В – константы.

Таким образом, на основе случайной величины X с нулевым математическим ожиданием $M{X}=C$ и единичной дисперсией $D{X}=B^2$ можно получить случайную величину \tilde{X} :

$$\tilde{X} = BX + C \tag{7.9}$$

с математическим ожиданием $M{X}=C$ и дисперсией $D{X}=B^2$.

7.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с моделированием детерминированных и случайных последовательностей, в том числе типовых последовательностей, и расчетом их характеристик программными средствами MATLAB.

7.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файла lr_07, который хранится на прилагаемом компакт-диске в папке LAB_DSP\LAB_07.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_07 по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 7.1 для номера бригады

 $N_{\delta p},$ где $N_{\delta p}$ =1, 2,...,30 . Функция $N_{\delta p}modM$ в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{\delta p}$ по модулю M .

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\Tables_07 хранятся табл. 7.1 исходных данных и пример ее заполнения для $N_{\delta p}^{=}1$.

		Таблица	1 7.1 . Таблица исх	одных данных
Переменна	яНазначение	Значение	Идентификатор	
$N_{\delta p}$	Номер бригады	$N_{\delta p}$	Nb =	
Ν	Длина	$N = +30 N_{6p}$	NT	
	последовательности mod 5			
Т	Период	T=		
	дискретизации	$0,0005(1+N_{6p})$	T =	
		mod 3)		
a	Основание	a		
	экспоненты	$= (-1)^{N_{6p}} (0,8)$		
		$+0,005N_{60}$)	a –	
		· · ·		

Таблица 7.1 (окончание)
---------------	------------

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
С	Амплитуда гармонического сигнала	$C = 1 + N_{\rm 6p} mod 5$	C =
$\widehat{\omega}_0$ (рад)	Частота гармонического сигнала	$\widehat{\omega}_{0} = \pi/(6 + N_{6p} \mod 5)$	w0 =
m	Задержка	$m = 5 + N_{\text{6p}} \mod 5$	m =
U	Амплитуда импульса	$U = N_{\rm 6p}$	U =
\mathbf{n}_0	Начальный момент импульса	$n_0 = N_{\rm 6p} mod 5 + 3$	n0 =

n _{imp}	Длина импульса	$n_{imp} = N_{6p}mod 5 + 5$	n_imp =
B_1, B_2, B_3	Амплитуды гармонических сигналов	$B_{1} = 1,5 + N_{6p}mod 5 = 5,7 - N_{6p}mod 5 = 2,2 + N_{6p}mod 5$	Вектор В = []
$\widehat{\omega}_1, \widehat{\omega}_2, \widehat{\omega}_3$	Частоты гармонических сигналов	$\widehat{\omega}_{1} = \pi/(4 + N_{6p} \mod 5)$ $\widehat{\omega}_{2} = \pi/(8 + N_{6p} \mod 5)$ $\widehat{\omega}_{3} = \pi/(16 + N_{6p} \mod 5)$	Вектор w = []
a ₁ , a ₂ , a ₃	Коэффициенты линейной комбинации гармонических сигналов	$a_{1} = 1,5 = -N_{6p}mod 5$ $a_{2} = 0,7 + N_{6p}mod 5$ $a_{3} = 1,4 - N_{6p}mod 5$	Вектор А = []
mean	Математическое ожидание	$mean = N_{6p}mod 5 + 3$	Mean =
var	Дисперсия	$var = N_{6p}mod 5 + 5$	Var =

Задание на лабораторную работу связано с моделированием и анализом последовательностей и включает в себя следующие пункты:

1. Цифровой единичный импульс u₀(nT) (идентификатор u0):

$$u_0(nT) = \begin{cases} 1, n = 0; \\ 0, n \neq 0 \end{cases}$$
 7.10)

(

с выводом графиков на интервале дискретного времени nT (идентификатор nT):

$$nT \in [0; (N-1)T]$$
 (7.11)

и дискретного нормированного времени n (идентификатор n):

$$n \in [0; (N-1)]$$
 (7.12)

Пояснить:

• взаимосвязь между дискретным и дискретным нормированным временем;

• различие между цифровым единичным импульсом и дельтафункцией.

2. Цифровой единичный скачок u₁(nT) (идентификатор u1):

$$u_1(nT) = \begin{cases} 1, & n \ge 0; \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$
(7.13)

с выводом графиков на интервалах времени (7.11) и (7.12). Пояснить:

• соответствие между цифровым и аналоговым единичными скачками;

чему равна частота дискретизации цифрового единичного скачка.

3. Дискретная экспонента x₁(nT) (идентификатор x1):

$$x_1(nT) = \begin{cases} a^n, & n \ge 0; \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$
(7.14)

с выводом графиков на интервалах времени (7.11) и (7.12).

Пояснить соответствие между дискретной и аналоговой экспонентами.

4. Дискретный комплексный гармонический сигнал х n₂() (идентификатор х2):

$$x_2(n) = Ce^{j\widehat{\omega}_0 n} (7.15)$$

с выводом графиков вещественной и мнимой частей на интервале времени (7.12).

Записать сигнал (7.15) в виде комбинации двух вещественных последователь- ностей.

5. Задержанные последовательности.

Вывести графики последовательностей (7.10), (7.13) и (7.14), задержанных на m отсчетов (идентификаторы u0_m, u1_m и x1_m), на интервале времени (7.12).

(

Записать формулы задержанных последовательностей.

6. Дискретный прямоугольный импульс x n₃():

$$x_3(n) = \begin{cases} U, n_0 \le n \le (n_0 + n_{imp} - 1); \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$$
 7.16)

с выводом графика на интервале времени (7.12). Выполнить моделирование импульса двумя способами:

• с помощью функции rectpuls — идентификатор x3 1;

• на основе цифрового единичного скачка — идентификатор x3_2. Пояснить:

формат функции rectpuls (познакомиться самостоятельно);

как выполняется моделирование импульса в обоих случаях.

7. Дискретный треугольный импульс.

Вывести график дискретного треугольного импульса $x_4(n)$ (идентификатор x4), сформированного посредством свертки дискретного прямоугольного импульса $x_3(n)$ (7.16) с самим собой, на интервале времени, равном длине свертки L:

$$n \in [0; (L-1)].$$
 7.17)

Для вычисления свертки использовать функцию: conv(x, y)

где х, у — сворачиваемые последовательности.

Привести аналитическую запись свертки. Определить теоретически и по графику длину свертки L и ширину треугольного импульса.

8. Линейная комбинация дискретных гармонических сигналов х n₅() (идентификатор х5):

$$x_5(n) = a_1 x 1(n) + a_2 x 2(n) + a_3 x 3(n)$$
7.18)

где

$$xi(n) = B_1 \sin(\widehat{\omega}_i n), i = 1, 2, 3,$$
 7 19)

с выводом графиков последовательностей xi n() и x n_5 () на интервале времени

$$n \in [0:(5N-1)].$$
 (7.20)

Вычислить среднее значение (идентификатор mean_x5), энергию (идентификатор E) и среднюю мощность (идентификатор P) последовательности (7.18).

Пояснить:

• операции при моделировании линейной комбинации сигналов (7.18);

как определяют указанные характеристики.

9. Дискретный гармонический сигнал с экспоненциальной огибающей.

Вывести график дискретного сигнала x₆(n) (идентификатор x6), представляющего собой дискретный гармонический сигнал x(n) (идентификатор x)

$$x(n) = Csin(\widehat{\omega}_0 n)$$

$$7.21)$$

с экспоненциальной огибающей $|a|^n$ на интервале времени (7.12)

Привести аналитическую формулу дискретного сигнала x₆(n) и пояснить операции при его моделировании.

10. Периодическая последовательность дискретных прямоугольных импульсов.

Вывести график пяти периодов периодической последовательности x₇(n)

(идентификатор х7) дискретных прямоугольных импульсов амплитуды U и длительности n_{imp} с периодом, вдвое большим длительности импульса.

Для формирования пяти периодов последовательности выполнить действия:

• на основе цифрового единичного скачка (7.13) сформировать один период последовательности (идентификатор хр);

• сформировать пять периодов последовательности с помощью функции repmat (см. разд. 2.1.2).

Пояснить операции при моделировании периодической последовательности.

11. Равномерный белый шум.

Вычислить оценки математического ожидания (идентификатор mean_uniform) и дисперсии (идентификатор var_uniform) равномерного белого шума (идентификатор r_uniform) длины 10 000 с математическим ожиданием и дисперсией, установленными по умолчанию.

Вывести график оценки автоковариационной функции $\hat{r}_x(m)$ шума (идентификатор r_r_uniform), центрированной относительно m=0.

Пояснить:

• чему равны истинные значения математического ожидания и дисперсии;

• каков вид истинной автоковариационной функции;

чему равна длина оценки автоковариационной функции.

12. Нормальный белый шум.

Вычислить оценки математического ожидания (идентификатор mean_norm) и дисперсии (идентификатор var_norm) нормального белого шума (идентификатор r_uniform) длины 10 000 с математическим ожиданием и дисперсией, установленными по умолчанию.

Вывести график оценки АКФ $\hat{R}_x(m)$ шума (идентификатор R_r_norm), центрированной относительно m=0.

Пояснить:

• чему равны истинные значения математического ожидания и дисперсии;

• каков вид истинной АКФ;

• чему равна длина оценки АКФ.

13. Аддитивная смесь $x_8(n)$ (идентификатор x8) дискретного гармонического сигнала x(n) (7.21) с нормальным белым шумом с выводом графика на интервале времени (7.12).

Пояснить, что понимают под аддитивной смесью сигнала с шумом.

14. Оценка АКФ $\hat{R}_x(m)$ (идентификатор R) последовательности $x_8(n)$ (см. п. 13) с выводом графика АКФ, центрированной относительно m=0.

Вывести оценку дисперсии последовательности $x_8(n)$ и значение $R_x(N)$. Пояснить:

• свойства АКФ;

• соответствие между выведенными значениями.

15. Нормальный белый шум с заданными статистическими характеристиками.

С помощью функции plot вывести графики четырех разновидностей нормального белого шума длины 10 000:

• с математическим ожиданием и дисперсией, установленными по умолчанию, — идентификатор шума r_norm (см. п. 12);

• с математическим ожиданием mean и дисперсией, установленной по умолчанию, — идентификатор шума r_normMean;

• с математическим ожиданием, установленным по умолчанию, и дисперсией var — идентификатор шума r_normVar;

• с математическим ожиданием mean и дисперсией var — идентификатор шума r normMeanVar.

Для наглядности вывести графики шумов в одинаковом диапазоне по оси ординат [-MAX MAX] с помощью функции ylim, где MAX равно максимальному значению шума среди четырех его разновидностей.

Построить гистограммы четырех разновидностей нормального белого шума с помощью функции hist (параметры задать по умолчанию).

Для наглядности вывести гистограммы в одинаковом диапазоне по оси абсцисс [-MAX MAX] с помощью функции xlim, где значение MAX определено ранее. В заголовке гистограмм вывести значения оценок математического ожидания (Mean value) и дисперсии (Variance).

Пояснить:

• к каким изменениям шума приводит изменение его математического ожидания и дисперсии;

• что отображает гистограмма и как она изменяется при изменении математического ожидания и дисперсии шума.

7.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должна быть представлена табл. 7.1 исходных данных для своего номера бригады $N_{\rm 6p}$.

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к script-файлу lr_07 по

его имени:

>> lr_07

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбина-

цию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками не закрывать.

Листинг script-файла lr_07 имеет вид:

```
>> type lr 07
script
clc
clear
disp('% ЛР №7. ДИСКРЕТНЫЕ СИГНАЛЫ')
disp('\%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ');
DATA=0;
while DATA==0
Nb = input('Nb = ');
                       % НОМЕРБРИГАДЫ
N = input('N = ');
                      % ДЛИНА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
\mathbf{T} = \operatorname{input}('T = ');
                     % ПЕРИОД ДИСКРЕТИЗАЦИИ
                     % ОСНОВАНИЕ ДИСКРЕТНОЙ ЭКСПОНЕНТЫ
\mathbf{a} = \operatorname{input}(\mathbf{a} = \mathbf{b});
C = input('C = '); % АМПЛИТУДА ДИСКРЕТНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО
СИГНАЛА
w0 = input('w0 = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО
СИГНАЛА
\mathbf{m} = input('m = ');
                   % ВЕЛИЧИНА ЗАДЕРЖКИ
U = input('U = ');
                   % АМПЛИТУДА ИМПУЛЬСА
n0 = input('n0 = ');
                   % МОМЕНТ НАЧАЛА ИМПУЛЬСА
n imp = input('n imp = '); <u>% ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА</u>
                   % ВЕКТОР АМПЛИТУД
\mathbf{B} = input('B = ');
\mathbf{w} = input('w = ');
                    % ВЕКТОР ЧАСТОТ
                           <u>% ВЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОЙ</u>
\mathbf{A} = \operatorname{input}(\mathbf{A} = \mathbf{b});
КОМБИНАЦИИ
Mean = input('Mean = '); % ЗАДАННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ
ШУМА
```

Var = input('Var = '); <u>% ЗАДАННАЯ ДИСПЕРСИЯ ШУМА</u> disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.1. ЦИФРОВОЙ ЕДИНИЧНЫЙ ИМПУЛЬС') disp('%') disp('%')disp('% Для вывода ГРАФИКОВ цифрового единичного импульса нажмите <ENTER>') pause 0:(N-1); nT = T.*n; % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ И n = НЕНОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ **u0** = [1 zeros(1,(N-1))]; <u>% ЦИФРОВОЙ ЕДИНИЧНЫЙ ИМ</u>ПУЛЬС figure('Name','Digital Unit Impulse, Unit Step, and Discrete Exponent', 'NumberTitle', 'off') subplot(3,2,1),stem(nT,u0,'Linewidth',2), grid title('Digital Unit Impulse u0(nT)') subplot(3,2,2),stem(n,u0,'Linewidth',2), grid title('Digital Unit Impulse u0(n)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ЦИФРОВОЙ ЕДИНИЧНЫЙ СКАЧОК'); disp('%') disp('%') disp(1% Для вывода ГРАФИКОВ цифрового единичного скачка нажмите <ENTER>') pause u1 = [1 ones(1,(N-1))]; % ЦИФРОВОЙ ЕДИНИЧНЫЙ СКАЧОК subplot(3,2,3),stem(nT,u1,'Linewidth',2), grid title('Digital Unit Step u1(nT)'),

```
subplot(3,2,4),stem(n,u1,'Linewidth',2), grid
title('Digital Unit Step u1(n)')
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. ДИСКРЕТНАЯ ЭКСПОНЕНТА')
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ дискретной экспоненты нажмите <ENTER>')
pause
x1 = a.^n; % ДИСКРЕТНАЯ ЭКСПОНЕНТА
subplot(3,2,5),stem(nT,x1,'Linewidth',2), xlabel('nT'), grid
title('Discrete Exponent x1(nT)')
subplot(3.2,6),stem(n, x1,'Linewidth',2), xlabel('n'), grid
title('Discrete Exponent x1(n)'),
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. ДИСКРЕТНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИГНАЛ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ вещественной и мнимой частей')
disp('% гармонического сигнала нажмите <ENTER>')
pause
                                                           КОМПЛЕКСНЫЙ
x2
      =
            C.*exp(j*w0.*n);
                                 % ЛИСКРЕТНЫЙ
ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИГНАЛ
figure('Name', 'Discrete Harmonic Signal', 'NumberTitle', 'off')
subplot(2,1,1),stem(n,real(x2),'Linewidth',2), grid
title('Discrete Harmonic Signal: REAL [x2(n)]')
subplot(2,1,2),stem(n,imag(x2),'Linewidth',2), xlabel('n'), grid
title(' Discrete Harmonic Signal: IMAG [x2(n)]')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
```

disp('% п.5. ЗАДЕРЖАННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ') disp('%') disp('%')disp(1% Для вывода ГРАФИКОВ задержанных последовательностей нажмите <ENTER>') pause % ЗАДЕРЖАННЫЙ ЦИФРОВОЙ u0(1:(N-m))];u0 m = [zeros(1,m)]ЕДИНИЧНЫЙ ИМПУЛЬС % ЗАДЕРЖАННЫЙ ЦИФРОВОЙ u1 m = [zeros(1,m)]u1(1:(N-m))]; ЕДИНИЧНЫЙ СКАЧОК = [zeros(1,m) x1(1:(N-m))]; % ЗАДЕРЖАННАЯ ДИСКРЕТНАЯ x1 m ЭКСПОНЕНТА figure('Name', 'Delayed Discrete Signals', 'NumberTitle', 'off') subplot(3,1,1),stem(n,u0 m,'Linewidth',2), grid title ('Delayed Digital Unit Impulse u0(n-m)') subplot(3,1,2),stem(n,u1 m,'Linewidth',2), grid title ('Delayed Digital Unit Step u1(n-m)') subplot(3,1,3),stem(n,x1 m,'Linewidth',2),xlabel('n'), grid title ('Delayed Discrete Exponent x1(n-m)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.6. ДИСКРЕТНЫЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ дискретного прямоугольного импульса нажмите <ENTER>') pause **x3** 1 = U*rectpuls(n-n0,2*n imp); $x3_1(1:n0) = 0; \frac{\% \text{ ФОРМИРОВАНИЕ}}{1}$ ИМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ rectpuls **x3** 2 = [zeros(1,n0) U.*u1((n0+1):(n0+n imp))...zeros(1,N-(n0+n_imp))]; <u>% ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ</u> ЦИФРОВОГО ЕДИНИЧНОГОСКАЧКА figure('Name','Discrete Rectangular and Triangular Impulses','NumberTitle', 'off') subplot(3,1,1),stem(n,x3 1,'Linewidth',2), grid title('Discrete Rectangular Impulse x3 1(n)')

subplot(3,1,2),stem(n,x3 2,'Linewidth',2), grid title('Discrete Rectangular Impulse x3 2 (n)') disp('%')disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.7. ДИСКРЕТНЫЙ ТРЕУГОЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС') disp('%')disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА дискретного треугольного импульса нажмите <ENTER>') pause **х4** = conv(x3_1,x3_1); <u>% ДИСКРЕТНЫЙ ТРЕУГОЛЬНЫЙ ИМ</u>ПУЛЬС L = 2*N-1; <u>% ДЛИНА СВЕРТКИ</u> $\mathbf{n} = 0$:(L-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ subplot(3,1,3),stem(n,x4,'Linewidth',2), xlabel('n'), grid title('Discrete Triangular Impulse x4(n)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% ЛИНЕЙНАЯ п.8. комбинация **ДИСКРЕТНЫХ** ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ гармонических сигналов и их линейной комбинации нажмите <ENTER>') pause n = 0:(5*N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ repmat(B,length(n),1).*sin(n'*w); % МАТРИЦА ДИСКРЕТНЫХ xi =ГАРМОНИК **ai** = repmat(A,length(n),1); <u>% МАТРИЦАКОЭФФИЦИЕНТОВ</u> x5 = sum((ai.*)xi)'); % ЛИНЕЙНАЯ КОМБИНАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК figure('Name','Discrete Harmonic Signals and their Linear **Combination**', 'NumberTitle', 'off') subplot(4,1,1),stem(n, xi(:,1),'Linewidth',2), grid title('First Discrete Harmonic Signal')

```
subplot(4,1,2),stem(n, xi(:,2),'Linewidth',2), grid
title('Second Discrete Harmonic Signal')
subplot(4,1,3), stem(n, xi(:,3), 'Linewidth', 2), grid
title('Third Discrete Harmonic Signal')
subplot(4,1,4),stem(n,x5,'Linewidth',2), xlabel('n'), grid
title('Linear Combination x5(n)')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ, ЭНЕРГИИ и СРЕДНЕЙ
МОЩНОСТИ сигнала х5
нажмите <ENTER>')
pause
mean x5 = mean(x5); % СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА
E = sum(x5.^2); % ЭНЕРГИЯ СИГНАЛА
P = sum(x5.^2)/length(x5); % СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ СИГНАЛА
disp('\%')
disp('%')
disp(['mean x5 = 'num2str(mean x5) 'E = 'num2str(E) 'P = 'num2str(P)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('%
                ДИСКРЕТНЫЙ
                                   ГАРМОНИЧЕСКИЙ
         п.9.
                                                           СИГНАЛ
                                                                       С
ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ)
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКА гармонического сигнала с экспоненциальной
огибаюшей
нажмите <ENTER>')
pause
\mathbf{n} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
x = C.*sin(w0.*n); % ДИСКРЕТНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИГНАЛ
х6 = х.*(abs(a).^n); <u>% ДИС</u>КРЕТНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИГНАЛ
СЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙОГИБАЮШЕЙ
figure('Name','Harmonic Signal with Exponential Envelope. Periodic Sequence
of
Rectangular Impulses', 'NumberTitle', 'off')
subplot(2,1,1),stem(n,x6,'Linewidth',2), grid
title('Harmonic Signal with Exponential Envelope x6(n)')
disp('%')
disp('%')
```

```
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('\%')
disp('%')
disp('%
          п.10.
                   ПЕРИОДИЧЕСКАЯ
                                           ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
ДИСКРЕТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ
ИМПУЛЬСОВ')
disp('%')
disp('%')
disp(1% Для вывода ГРАФИКА пяти периодов последовательности нажмите
<ENTER>')
pause
xp = [U.*u1(1:n imp) zeros(1,n imp)]; % ПЕРИОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
р = 5; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ
и = repmat(xp,1,p); % ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
\mathbf{n} = 0:(length(x7)-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
subplot(2,1,2), stem(n,x7,'Linewidth',2), xlabel('n'), grid
title('Periodic Sequence of Rectangular Impulses x7(n)')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.11. РАВНОМЕРНЫЙ БЕЛЫЙ ШУМ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ОЦЕНОК МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ
                                                                   И
ДИСПЕРСИИ ШУМА нажмите
<ENTER>')
pause
r uniform = rand(1,10000); % РАВНОМЕРНЫЙБЕЛЫЙШУМ
mean uniform = mean(r uniform); % ОЦЕНКАМАТ. ОЖИДАНИЯШУМА
var uniform = var(r uniform); % ОЦЕНКАДИСПЕРСИИШУМА
disp('%')
disp('%')
disp(['mean uniform = 'num2str(mean uniform) 'var uniform = '
num2str(var uniform)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода графика АВТОКОВАРИАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ нажмите
<ENTER>')
pause
```

r r uniform = (1/length(r uniform)).*xcov(r uniform); % ОЦЕНКА АВТОКОВАРИАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ РАВНОМЕРНОГО БЕЛОГО ШУМА **m** = -(length(r uniform)-1):(length(r uniform)-1); % ВЕКТОР ДИСКРЕТНЫХ СДВИГОВДЛЯАВТОКОВАРИАЦИОННОЙФУНКЦИИ figure('Name', 'Autocovariance Function of Uniform White Noise', 'NumberTitle', 'off') stem(m,r r uniform,'Linewidth',2), xlabel('m'), grid title('Autocovariance Function of Uniform White Noise') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.12. НОРМАЛЬНЫЙ БЕЛЫЙ ШУМ') disp('%')disp('%') disp('% Для вывода ОЦЕНОК МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ И ДИСПЕРСИИ шума нажмите <ENTER>') pause r norm = randn(1,10000); % НОРМАЛЬНЫЙБЕЛЫЙШУМ mean norm = mean(r norm); % ОЦЕНКАМАТ. ОЖИДАНИЯ ШУМА var norm = var(r norm); % ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ШУМА disp('%') disp('%') disp(['mean norm = 'num2str(mean norm) 'var norm = 'num2str(var norm)]) disp('%') disp('%') disp('% Для вывода графика АКФ нажмите <ENTER>') pause (1/length(r_norm)).*xcorr(r_norm); % **R** r norm ОЦЕНКА АКΦ НОРМАЛЬНОГО БЕЛОГО ШУМА -(length(r norm)-1):(length(r norm)-1); % BEKTOP **ДИСКРЕТНЫХ** m = СДВИГОВ ДЛЯ АКΦ figure('Name','ACF of White Gaussian Noise','NumberTitle', 'off') stem(m,R r norm,'Linewidth',2), xlabel('m'), grid title('ACF of White Gaussian Noise') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause disp('%') disp('%') disp('% АДДИТИВНАЯ **ДИСКРЕТНОГО** п.13. СМЕСЬ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА С НОРМАЛЬНЫМ БЕЛЫМ ШУМОМ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА аддитивной смеси сигнала с шумом нажмите <ENTER>') pause n = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ x8 = x + randn(1,N); % АДДИТИВНАЯ СМЕСЬ СИГНАЛА С ШУМОМ figure('Name','Mixture of Harmonic Signal and White Gaussian Noise and **ACF'**, 'NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1),stem(n,x8,'Linewidth',2),xlabel('n'), grid title('Mixture of Harmonic Signal and White Gaussian Noise x8(n)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp('% п.14. АКФ АДИТИВНОЙ СМЕСИ **ДИСКРЕТНОГО** ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА С НОРМАЛЬНЫМ БЕЛЫМ ШУМОМ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА АКФ нажмите <ENTER>') pause $\mathbf{R} = (1/N).*xcorr(x8);$ <u>% OUEHKA AKФ</u> m = -(N-1):(N-1); % ВЕКТОР ДИСКРЕТНЫХ СДВИГОВ ДЛЯ АКФ subplot(2,1,2),stem((m),R,'Linewidth',2),xlabel('m'), grid title('ACF R(m)') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ДИСПЕРСИИ аддитивной смеси сигнала с шумом и АКФ R(N)нажмите<ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['var x8 = 'num2str(var(x8))])

disp(['R(N) = 'num2str(R(N))])disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% НОРМАЛЬНЫЙ БЕЛЫЙ п.15. ШУМ С ЗАДАННЫМИ СТАТИСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ') r normMean = randn(1,10000)+Mean; % НОРМАЛЬНЫЙ БЕЛЫЙ ШУМ С ЗАДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОЖИДАНИЕМ r normVar = sqrt(Var).*randn(1,10000); % НОРМАЛЬНЫЙ БЕЛЫЙ ШУМ С ЗАДАННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ r normMeanVar = sqrt(Var).*randn(1,10000)+ Mean; % НОРМАЛЬНЫЙ БЕЛЫЙ ШУМ С ЗАДАННЫМИ МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОЖИДАНИЕМ И ДИСПЕРСИЕЙ MAX = max([r norm r normMean r normVar r normMeanVar]); % МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ШУМА СРЕДИ ЧЕТЫРЕХ ЕГО РАЗНОВИЛНОСТЕЙ disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ нормального шума нажмите белого <ENTER>') pause figure('Name', 'White Gaussian Noises with different statistics', 'NumberTitle', 'off') subplot(4,1,1), plot(r norm), grid, ylim([-MAX MAX]) Глава 7. Дискретныесигналы 115 title(strcat(['Mean value = ',num2str(mean(r norm)),' Variance = ',num2str(var(r norm))])) subplot(4,1,2), plot(r normMean), grid, ylim([-MAX MAX]) title(strcat(['Mean value = ',num2str(mean(r normMean)),'Variance = ',num2str(var(r normMean))])) subplot(4,1,3), plot(r normVar), grid, ylim([-MAX MAX]) title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r normVar)),' Variance = ',num2str(var(r normVar))])) subplot(4,1,4), plot(r normMeanVar), xlabel('n'), grid, ylim([-MAX MAX]) title(strcat(['Mean value = ',num2str(mean(r normMeanVar)),'Variance = ',num2str(var(r normMeanVar))])) disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ГИСТОГРАММ нормального белого шума нажмите <ENTER>')

pause

figure('Name','Histograms with different statistics','NumberTitle', 'off')
subplot(4,1,1), hist(r_norm), grid, xlim([-MAX MAX])
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_norm)),' Variance =
',num2str(var(r_norm))]))
subplot(4,1,2), hist(r_normMean), grid, xlim([-MAX MAX])
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_normMean)),' Variance =
',num2str(var(r_normMean))]))
subplot(4,1,3), hist(r_normVar), grid, xlim([-MAX MAX])
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_normVar)),' Variance =
',num2str(var(r_normVar))]))
subplot(4,1,4),hist(r_normMeanVar), grid, xlim([-MAX MAX])
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_normVar)),' Variance =
',num2str(var(r_normVar))]))
subplot(4,1,4),hist(r_normMeanVar), grid, xlim([-MAX MAX])
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_normVar)),' Variance =
',num2str(var(r_normMeanVar), grid, xlim([-MAX MAX]))
title(strcat([' Mean value = ',num2str(mean(r_normMeanVar)),' Variance =
',num2str(var(r_normMeanVar), grid, xlim([-MAX MAX])

disp('%')

disp('%')

disp('% РАБОТА ЗАВЕРШЕНА')

7.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании functionфайлов для моделирования последовательностей с использованием исходных данных из табл. 7.1 для своего номера бригады N_{6p} .

Моделируемые последовательности выбираются из следующего списка:

1С. Линейная комбинация дискретных гармонических сигналов:

 $x(n) = a_1 x 1(n) + a_2 x 2(n) + a_3 x 3(n),$

где:

$$xi(n) = Re\{B_i e^{j\widehat{\omega}_i n}\}, i=1,2,3,$$

с выводом графиков последовательностей xi(n) и x(n) на интервале времени $n \in [0; (3N - 1)]$.

2С. Дискретный прямоугольный импульс с амплитудой U , длительностью $2n_{imp}$ и моментом начала 2_{n0} с выводом графика на интервале времени.

Определить энергию и мощность импульса.

3С. Периодическая последовательность дискретных прямоугольных импульсов с амплитудой U, длительностью n_{imp} и периодом, втрое большим длитель- ности импульса, с выводом графика для заданного числа периодов.

4С. Оценка автоковариационной функции $r_x(m)$ аддитивной смеси дискретного гармонического сигнала x(n) с нормальным белым шумом с параметрами, заданными по умолчанию, с выводом графика оценки автоковариационной функции, центрированной относительно m=0.

5С. Аддитивная смесь дискретного гармонического сигнала x(n) с нормальным белым шумом с математическим ожиданием mean и дисперсией var с выводом графика на интервале времени.

6С. Оценка АКФ нормального белого шума с математическим ожиданием mean и дисперсией var с выводом графика оценки АКФ, центрированной относительно m=0.

7С. Дискретный гармонический сигнал с изменением мгновенной частоты (ЧМ-сигнал):

$$|x(t)|_{t=nT} = \cos(2\pi f(t)t)$$
 (7.22)

Вычислить с помощью функции: **x**= chirp(t,f0,t1,f1,method)

где t, х — векторы значений дискретного времени nT (c) и последовательности x(nT) (7.22); f0 — начальная частота f_0 (Гц); t1, f1 — момент дискретного времени t₁ (c) и значение частоты $f_1(t_1)$ (Гц); method — закон изменения мгновенной частоты f(t):

'linear' — линейный:
$$f(t) = f_0 + (f_1 - f_0) \left(\frac{t}{t_1} \right)$$

'quadratic' — квадратичный: $f(t) = f_0 + (f_1 - f_0)(t / t_1)^2$

'logarithmic' — логарифмический (в

действительности экспоненциальный):

$$f(t) = f_0 (f_1/f_0)^{t/t_1}$$

Вывести графики последовательности х(nT) (7.22) с помощью функции plot на интервале дискретного времени $t = nT \in [0; 50(N - 1)]T$ с шагом T при $f_0=10$,

 $t_1 = 50(N-1)T$ и $f_1 = 50$ и различных значениях параметра method.

8С. Последовательность с однотональной амплитудной модуляцией (АМ-сигнал):

$$x(n) = C[1 + m\cos(\Omega n + \varphi_{\Omega})]\cos(\omega_0 n + \varphi_0)$$
(7.23)

где С, $\hat{\omega}_0$ и ϕ_0 — соответственно амплитуда, частота и начальная фаза несущего колебания; Ω и ϕ_{Ω} — частота и начальная фаза модулирующего колебания; т — коэффициент модуляции (глубина модуляции), т \in [0,1].

Вывести графики последовательности *x(n)* с помощью функции plot на интервале п∈[0;(20*N*−1)] при следующих значениях параметров АМ-сигнала:

•
$$\varphi_0 = \pi/3$$
, $\Omega = \hat{\omega}_0/4$, $\varphi_\Omega = \pi/6$, m=0,5;

$$\phi_0 = 0, \Omega = \widehat{\omega}_0/4, \varphi_\Omega = 0,$$
 при *m*=0,5, *m*=0 и *m*=1.

9С. Последовательность в виде Гауссова радиоимпульса:

$$x(n) = e^{-an^2} \cos(\omega_1 n),$$
 (7.24)

где а — параметр, управляющий длительностью радиоимпульса, $\widehat{\omega}_1$ — несущая частота.

Вывести графики последовательности *x(n)* с помощью функции plot при следующих значениях параметров Гауссова радиоимпульса:

 $\widehat{\omega}_1 = \widehat{\omega}_0/2$

a=0,0005; 0,001; 0,005,

на интервале $n \in [-3(N-1); 3(N-1)]$ и на интервале $n \in [0; 6(N-1)]$ (со сдвигом в область положительного времени).

10С. Последовательность:

$$x(t)|_{t=nT} = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$$

$$7.25)$$

Вычислить с помощью функции: $x = \sin c(t)$

где t, x — векторы значений дискретного времени nT (c) и последовательности x(nT).

Вывести графики последовательностих(*nT*) на интервале

 $t = nT \in [-500(N - 1)T; 500(N - 1)T]$

с шагом Т и на интервале

 $t = nT \in [0:1000(N-1)T]$

(со сдвигом в область положительного времени).

7.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения каждого пункта задания, включая копируемые из окна **Command Window** результаты вычислений (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде **Edit** | **Copy Figure** в окне **Figure**) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

1. Дайте определение дискретного и цифрового сигналов.

2. Как математически описывается дискретный сигнал?

3. Какой тип данных используется по умолчанию при описании последовательностей в MATLAB?

4. Что такое период и частота дискретизации и как они связаны друг с другом?

5. Дайте определение дискретного нормированного времени.

6. Дайте определение нормированной частоты ω.

7. Какие дискретные сигналы называют детерминированными?

8. Назовите основные характеристики детерминированных дискретных сигналов.

9. Поясните, с какой целью и как вычисляются автокорреляционная и автоковариационная функции.

10. Какими свойствами обладает АКФ?

11. Какие дискретные сигналы называют случайными?

12. Что такое ансамбль реализаций случайного дискретного сигнала?

13. Назовите основные статистические характеристики случайных дискретных сигналов.

14. Как определяются основные статистические характеристики случайных дискретных сигналов по ансамблю реализаций?

15. Какие случайные дискретные сигналы называют стационарными в широком смысле?

16. Какие случайные дискретные сигналы называют эргодическими?

17. Дайте определение равномерного белого шума и нормального белого шума.

18. Какой вид имеют АКФ нормального белого шума и автоковариационная функция равномерного белого шума?

Лабораторная работа №3 Линейные дискретные системы

Цель работы: изучить математическое описание линейных дискретных систем и овладеть программными средствами их моделирования и анализа в MATLAB.

8.1. Краткая теоретическая справка

Системой обработки сигналов (системой) называется объект, выполняющий требуемое преобразование входного сигнала (воздействия) в выходной (реакцию).

В соответствии с определением, системой можно называть как физическое устройство, так и математическое преобразование. По умолчанию под системой будем понимать математическое преобразование.

Математической моделью системы называют ее *соотношение вход/выход*, которое устанавливает связь между входным и выходным сигналами.

Систему называют *линейной*, если она отвечает условиям аддитивности (реакция на сумму воздействий равна сумме реакций на данные воздействия¹) и однородности (воздействию, умноженному на весовой коэффициент, соответствует реакция, умноженная на тот коэффициент).

Систему называют дискретной, если она преобразует дискретное воздействие x(n)в дискретную реакцию y(n).

Систему называют *стационарной*, если ее реакция инвариантна по отношению к началу отсчета времени (свойство инвариантности во времени). Параметры стационарной системы неизменны во времени; задержке воздействия соответствует такая же задержка реакции.

По умолчанию будем рассматривать стационарные линейные дискретные системы (ЛДС).

Нулевые начальныеусловия (ННУ) означают, что все значения воздействия и реакции, которые может помнить ЛДС в моменты времени, предшествующие началу воздействия²n=0, равны нулю:

$$\begin{cases} x(n-i) | (n-i) < 0, i = 1, 2, ... = 0, \\ y(n-k) | (n-k) < 0, k = 1, 2, ... = 0, \end{cases}$$

т. е. воздействие и реакция в области отрицательного времени n<0 равны нулю.

В ЛДС с одним входом и одним выходом соотношение вход/выход представляет собой линейное математическое преобразование, вид которого

¹ Принцип суперпозиции.

 $^{^{2}}$ Здесь и далее используется дискретное нормированное время n = nT/T

однозначно связан с основной характеристикой ЛДС во временной области или в z-области.

Под моделированием ЛДС понимают вычисление ее реакции в соответствии с соотношением вход/выход, а под анализом ЛДС — анализ ее характеристик во временной, z- и частотной областях.

8.1.1. Описание ЛДС во временной области

Основной характеристикой ЛДС во временной области является импульсная характеристика (ИХ).

Импульсной характеристикой h(n) ЛДС называют ее реакцию на цифровой единичный импульс $u_0(n)$ при ННУ.

Соотношение вход/выход ЛДС, однозначно связанное с его основной характеристикой во временной области — ИХ, имеет вид линейного математического преобразования в виде формулы свертки:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(n-m)x(m) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m)x(n-m),$$
 8.1.)

где т — задержка последовательности.

Соотношение вход/выход ЛДС, однозначно связанное с его основной характеристикой в z-области — передаточной функцией (о которой пойдет речь в разд. 8.1.2), имеет вид линейного математического преобразования в виде разностного уравнения (РУ):

$$y(n)\sum_{i=0}^{N-1}bix(n-i) - \sum_{k=1}^{M-1}aky(n-k),$$
 8.2.)

где b_i , a_k — вещественные коэффициенты РУ — параметры ЛДС; i, k — значения задержек воздействия и реакции; (N-1), (M-1) константы, определяющие максимальные задержки.

В отличие от линейных аналоговых систем, где соответствующие соотношения вход/выход имеют вид интеграла свертки или линейного дифференциального уравнения, вычисление реакции по формуле свертки (8.1) или РУ (8.2) выполняется методом прямой подстановки при ННУ, т. е. эти соотношения непосредственно описывают алгоритмы вычисления реакции.

По виду РУ различают два типа ЛДС:

в рекурсивная ЛДС, реакция которой зависит от текущего и предшествующих отсчетов воздействия и предшествующих отсчетов реакции, т. е.:

 $a_k \neq 0$ хотя бы для одного значения k;

у нерекурсивная ЛДС, реакция которой зависит только от текущего и предшествующих отсчетов воздействия, т. е.:

 $a_k = 0$ для всех k.

Рекурсивные и нерекурсивные ЛДС имеют соответственно бесконечную и конечную ИХ, отсюда их тождественные названия:

«КИХЛДС (FIR — Finite Impulse Response).

Импульсная характеристика КИХ ЛДС совпадает с коэффициентами b_i РУ (8.2):

$$h(n) = b_i, n = i. \tag{8.3}$$

В МАТLАВ вычисление реакции по формуле свертки (8.1) выполняется с помощью функции:

y = conv(h, x)

где h — вектор отсчетов ИХ длины N_1 ; бесконечная ИХ рекурсивной ЛДС ограничивается до конечной длины; х — вектор отсчетов воздействия длины N_2 ; у — вектор отсчетов реакции длины L = N1 + N2 - 1 (длина свертки). Вычисление реакции по РУ (8.2) выполняется с помощью функции:

y = filter(b,a,x)

где b, а — векторы коэффициентов [b₀, b₁, ..., b_{N-1}] и [1, a₁, ..., a_{M-1}]; х — вектор отсчетов воздействия; у — вектор отсчетов реакции с длиной, равной длине воздействия.

Обратим внимание на то, что коэффициенты а_к записываются без учета знака "минус", стоящего перед суммой в РУ (8.2).

Импульсная характеристика вычисляется с помощью функции:

h = impz(b,a,N)

где b, а — определены ранее для функции filter; N — количество отсчетов (длина) ИХ; h — вектор отсчетов ИХ.

Импульсная характеристика может также вычисляться с помощью функции filter, если в качестве воздействия используется цифровой единичный импульс (7.10).

8.1.2. Описание ЛДС в z-области

Основной характеристикой ЛДС в z-области является передаточная функция H(z) — z-изображение ИХ h(n):

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n) z^{-n}$$

Передаточной функцией ЛДС называют отношение z-изображения реакции к z-изображению воздействия при ННУ:

$$H(z) = Y(z)/X(z).$$

Данное отношение легко получить, выполнив Z-преобразование РУ (8.2). Передаточная функция рекурсивной ЛДС имеет вид дробно-рациональной функции

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}}$$
8.4)

Показатель степени z^{-i} соответствует задержкам воздействия, а z^{-k} — задержкам реакции; коэффициенты a_k передаточной функции и РУ (8.2) имеют противоположные знаки.

Для нерекурсивных ЛДС передаточная функция, с учетом (8.3), принимает вид:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$$
8.5)

Порядок рекурсивной ЛДС равен порядку знаменателя передаточной функции (М-1) при соблюдении условия (N-1) ≤(М-1) (по умолчанию).

Порядок нерекурсивной ЛДС равен (N-1).

Нулями передаточной функции называют значения z, при которых она равна нулю, а полюсами (особыми точками) — значения z, при которых ее знаменатель равен нулю.

Картой нулей и полюсов называют z-плоскость с нанесенной единичной окруж- ностью и символически изображенными нулями и полюсами.

По карте нулей и полюсов можно сделать вывод об устойчивости ЛДС: полюсы устойчивой ЛДС располагаются внутри единичного круга [1].

Комплексно сопряженные нули $z_{k1,2}$ и полюсы $z_{*k1,2}$ представляют в показательной форме, где аргументы — углы (в радианах) на комплексной z-плоскости:

$$\begin{cases} z_{\circ k1,2} = r_{\circ k} e^{\pm j \varphi_{\circ k}} \\ z_{*k1,2} = r_{*k} e^{\pm j \varphi_{*k}} \end{cases}$$
8.6)

Помимо общего вида (8.4), передаточная функция рекурсивных ЛДС может быть представлена следующими своими разновидностями¹:

S произведение простейших множителей:

$$H(z) = b_0 \prod_{k=1}^{M-1} \frac{(1 - z_{\circ k} z^{-1})}{(1 - z_{\ast k} z^{-1})}$$
8.7)

где $z_{\diamond k}, z_{*k}$ — соответственно k-е нуль и полюс передаточной функции (8.4).

В общем случае нули и полюсы — попарно комплексно сопряженные числа; % произведение множителей второго порядка:

$$h(Z) = \prod_{k=1}^{L} \frac{b_{0k} + \tilde{b}_{1k} z^{-1} + \tilde{b}_{2k} z^{-2}}{1 + a_{1k} z^{-1} + a_{2k} z^{-2}}$$
8.8)

где b_{0k} , b_{1k} , b_{2k} , a_{1k} , a_{2k} — вещественные коэффициенты рекурсивных звеньев

2-го порядка, называемых также биквадратными; L — количество звеньев, равное $L = int\left(\frac{M-1}{2}\right)$

¹ Приведены разновидности, представленные в MATLAB стандартными функциями.

где int — функция округления до ближайшего целого в сторону увеличения.

В MATLAB используется представление передаточной функции в эквивалентном виде, получаемом при вынесении за скобки коэффициентов b_{0k}:

$$H(z) = G \prod_{k=1}^{L} \frac{1 + b_{1k} z^{-1} + b_{2k} z^{-2}}{1 + a_{1k} z^{-1} + a_{2k} z^{-2}}$$

$$8.9)$$

где $G = b_{01} \cdot b_{02} \cdot ... \cdot b_{0L}$ — коэффициент усиления, а соответствующие коэффициенты связаны соотношениями: $b_{1k} = \hat{b}_{1k}/G$; $b_{2k} = \hat{b}_{2k}/G$

сумма простых дробей:

$$H(z) = \sum_{k=1}^{M-1} H_k(z) = \sum_{k=1}^{M-1} \frac{A_k}{1 - z_{*k} z^{-1}}$$
8.10)

где z_{*k} — простой (не кратный) k-й полюс передаточной функции A_k — коэффициент разложения при k-м полюсе; A_k и z_{*k} — всегда числа одинакового типа, комплексные или вещественные.

При одинаковых порядках числителя и знаменателя (М – 1) = (N – 1) в (8.4) будем иметь в (8.10) *целую часть* — вещественную константу С:

$$H(z) = \sum_{k=1}^{M-1} \frac{Ak}{1 - z * kz - 1} + c$$
8.11)

В MATLAB для представления передаточной функции (8.4) в виде произведения простейших множителей (8.7) используется функция:

[q,p,K] = tf2zpk(b,a)

где b, а — векторы коэффициентов числителя [b₀, b₁, ..., b_{N-1}] и знаменателя [1, a₁, ..., a_{M-1}] передаточной функции (8.4); q, p — векторыстолбцы нулей z_{k} и полюсов z_{k} передаточной функции (8.7), представленные в алгебраической форме; К — коэффициент усиления b₀ в (8.7).

Представление передаточной функции (8.4) в виде произведения множителей второго порядка (8.9) выполняется с помощью функции:

[s,G] = tf2sos(b,a)

где b, а — определены ранее для функции tf2zpk; G — коэффициент усиления G в (8.9); s — матрица коэффициентов числителей и знаменателей биквадратных звеньев передаточной функции (8.9) в виде:

$\begin{bmatrix} 1 \ b_{11}b_{21} \ 1 \ a_{11}a_{21} \\ 1 \ b_{11}b_{21} \ 1 \ a_{11}a_{21} \end{bmatrix}$	(10)
$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & b_{1L} & b_{2L} & 1 & a_{1L} & a_{2L} \end{bmatrix}$	8.12)

Для представления передаточной функции (8.4) в виде суммы простых дробей (8.11) применяется функция:

[r, p, c] = residuez(b, a)

где b, а — определены ранее для функции tf2zpk; r, p — векторы-столбцы коэффициентов разложения A_k и полюсов z_{*k} в (8.11), представленные в

алгебраической форме; с — целая часть ^С в (8.11); при ее отсутствии выводится пустая матрица с=[].

Карта нулей и полюсов передаточной функции выводится с помощью функции:

zplane(b,a)

8.1.3. Описание ЛДС в частотной области

Основной характеристикой ЛДС в частотной области является частотная характе-

ристика (ЧХ) $H(e^{j\omega}) - \Phi$ урье-изображение ИХ h(n):

$$H(e^{j\widehat{\omega}}) = \sum_{n=0}^{\infty} h(n)e^{-j\widehat{\omega}n}$$

где $\widehat{\omega}$ — нормированная частота:

$$\widehat{\omega} = \omega T$$
 (рад) 8.13)

Частотная характеристика $H(e^{j\omega})$ связана с передаточной функцией H(z) соотношением:

$$H(e^{j\widehat{\omega}}) = H(z)_{|z=e^{j\omega}}$$

$$8.14)$$

что позволяет путем подстановки $z = e^{j\omega}$ в (8.4) получить ее в виде:

$$H(e^{j\widehat{\omega}}) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i e^{-ji\widehat{\omega}}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k e^{-jk\widehat{\omega}}}$$

$$8.15)$$

Частотную характеристику $H(e^{j\omega})$ (8.15) можно представить в показательной форме:

$$H(e^{j\widehat{\omega}}) = |H(e^{j\widehat{\omega}})|e^{j\arg\{H(e^{j\widehat{\omega}})\}} = A(\widehat{\omega})e^{j\varphi(\widehat{\omega})}$$

$$($$
8.16)

Модуль $A(\hat{\omega})$ и аргумент $\varphi(\hat{\omega})$ частотной характеристики соответствуют амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам ЛДС.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отображает частотную зависимость отношения амплитуды реакции к амплитуде гармонического воздействия в установившемся режиме.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) отображает частотную зависимость разности фаз реакции и гармонического воздействия в установившемся режиме.

АЧХ и ФЧХ — периодические функции с периодом 2π в шкале частот $\hat{\omega}$ или f_{π} в шкале частот f (Гц).

АЧХ — четная, а ФЧХ — нечетная функция частоты.

АЧХ и ФЧХ рассчитываются в основной полосе частот $[0; \pi]$ в шкале частот $\hat{\omega}$ или $[0; f_{\pi}/2]$ в шкале частот $f(\Gamma \mathfrak{U})$.

По карте нулей и полюсов можно определить местоположение максимумов, минимумов и нулей АЧХ в основной полосе частот [0; π], а именно:

Вчастота комплексно сопряженного нуля $\widehat{\omega}_{\circ k}$, где $\widehat{\omega}_{\circ k} = \varphi_{\circ k}$ в (8.6), соответствует частоте *минимума* АЧХ (приблизительно), если $r_{\circ k} \neq 1$, или нуля АЧХ, если

 $r_{\circ k}\!=\!\!1$ (комплексно сопряженные нули на единичной окружности); в точке нуля

АЧХ наблюдается скачок Φ ЧХ на π ;

Вещественным нулям $z_k = 1$ и/или $z_k = -1$ (на единичной окружности) соответствует нуль АЧХ на границе основной полосы частот 0 и/или π .

В MATLAB частотная характеристика (8.15) вычисляется с помощью функции freqz одного из следующих форматов:

- H = freqz(b,a,f,Fs)
- H = freqz(b,a,w)

H = freqz(b,a,N)

где: b, а — определены ранее для функции tf2zpk (см. разд. 8.1.2); f — вектор частот в герцах; Fs — частота дискретизации f_{π} (Гц); w — вектор нормированных частот $\hat{\omega}$ (рад); N — количество точек ЧХ; в отсутствии параметра по умолчанию N = 512; H — вектор комплексных значений ЧХ.

Модуль частотной характеристики (АЧХ) определяется с помощью функции abs(H), а аргумент (ФЧХ) — с помощью функции angle(H) (см. табл. 1.4).

8.1.4. Структуры звеньев 2-го порядка

Структура (структурная схема) ЛДС отображает алгоритм вычисления реакции по РУ и определяется видом передаточной функции.

Для рекурсивных звеньев 2-го порядка с передаточной функцией

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$
8.17)

и разностным уравнением

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n - 1_{+b_2 x(n-2)} - a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2)$$

поддерживаются следующие структуры:

прямая¹ — Direct-FormI (рис. 8.1, a);

прямаятранспонированная — Direct-Form I Transposed (рис. 8.1, б);

прямая каноническая — Direct-Form II (рис. 8.1, в);

прямая каноническая транспонированная — Direct-Form II Transposed (рис. 8.1, г).

¹ Прямой структуре соответствует представление передаточной функции в виде (8.17), а остальным прямым структурам — ее модификации и модификации РУ.

В MATLAB структуры описываются в виде объекта dfilt (от англ. Discrete-time filter object):

Hd = dfilt.structure(b,a)

где Hd — имя объекта; dfilt — тип объекта; structure — функция, задающая конкретную структуру объекта Hd (табл. 8.1); b, а — параметры функции structure — векторы коэффициентов передаточной функции (8.4), определенные ранее для функции tf2zpk (см. разд. 8.1.2).

a)



б)



в)



Рис. 8.1. Структурные схемы рекурсивного звена 2-го порядка: прямая (Direct-Form I) (а); прямаятранспонированная (Direct-Form I Transposed) (б);

прямая каноническая (Direct-Form II) (в)



Рис. 8.1. Структурные схемы рекурсивного звена 2-го порядка: прямая каноническая транспонированная (Direct-Form II Transposed) (г) Свойства объекта dfilt с именем Hd для рекурсивных звеньев 2-го порядка включают в себя:

℅ FilterStructure — структура звена;

S Arithmetic — форма представления данных;

SNumerator — коэффициенты числителя передаточной функции;

S Denominator — коэффициенты знаменателя передаточной функции;

SpersistentMemory — начальные условия при вычислении реакции; значение false соответствует ННУ (см. разд. 8.1.1).

Структуры звеньев 2-го порядка, описываемые в виде объектов dfilt, приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Функции structure и структуры рекурсивных звеньев 2-го порядка

Функция structure	Структура рекурсивного звена 2-го порядка
df1	Direct-Form I (прямая, см. рис. 8.1, а)
df1t	Direct-Form I Transposed (прямая транспонированная, см. рис. 8.1, б)
df2	Direct-Form II (прямая каноническая, см. рис. 8.1, в)
df2t	Direct-Form II Transposed (прямая каноническая транспонированная, см. рис. 8.1, г)

8.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с моделированием ЛДС, анализом ее характеристик и описанием структур программными средствами MATLAB на примере рекурсивных звеньев 2-го порядка.

8.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файла lr_08 и functionфайла input_1, которые хранятся на прилагаемом компакт-диске в папке LAB_DSP\LAB_08.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_08 по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 8.2 для номера бригады

 $N_{\delta p},$ где $N_{\delta p}$ =1, 2,...,30 . Функция $N_{\delta p} \mbox{ mod } M$ в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{\delta p}$ по модулю M .

Коэффициенты передаточной функции (8.17) b_0 , b_1 , b_2 , и a_1 a_2 , (см. табл. 8.2) рассчитываются с точностью до четырех значащих цифр¹.

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
N _{6p}	Номер бригады	N _{бр}	Nb =
$egin{array}{c} b_0 \ b_1 \ b_2 \end{array}$	Коэффициенты числителя передаточной функции	$b_{0} = 0.5 + 0.02N_{6p}$ $b_{1} = b_{0}(-1)^{N_{6p}+1} + (0.9822 + 0.0178N_{6p})$ $b_{2} = b_{0}[0.8 + 0.2(N_{6p} \mod 5)]$	Вектор b = []
a ₀	Коэффициенты	$a_0 = 1$	Вектор
a ₁ a ₂	знаменателя передаточной функции	$a_{1} = (-1)^{N_{6p}} + (0,7778 + 0,025N_{6p})$ $a_{2} = 0,64 + 0,006N_{6p}$	a = [1]
N_1	Длина ИХ	$N_1 = N_{\rm \delta p} \mod 10 + 20$	N1 =

Таблица 8.2. Таблица исходных данных

N_2	Длина	$N_2 = N_{\rm 6p} \mod 10$	N2 =	
	воздействия	+ 30		1
f_{π}	Частота	$f_{\rm A}=1000N_{ m Gp}$	Fs =	Это
уд	дискретизации			удобно

сделать в MATLAB в режиме прямых вычислений

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\Tables_08 хранятся табл. 8.2 исходных данных и пример ее заполнения для $N_{\delta p}^{=}1$.

Задание на лабораторную работу связано с моделированием рекурсивного звена 2-го порядка и анализом его характеристик и включает в себя следующие пункты:

1. Вычисление импульсной характеристики (идентификатор h1) длины N₁ с помощью функции impz с выводом графика.

Записать аналитическую формулу ИХ рекурсивного звена 2-го порядка с учетом ННУ. Пояснить, чему в действительности равна длина ИХ.

2. Вычисление импульсной характеристики (идентификатор h2) с помощью функции filter с выводом графика.

Пояснить, что и почему выбрано в качестве воздействия.

3. Вычисление реакции y₁(n) (идентификатор y1) по формуле свертки.

В качестве воздействия x(n) длины N₂ выбрать дискретный прямоугольный импульс (идентификатор x):

$$x(n) = \begin{cases} 1, & 0 \le n \le int(N_2/2) \\ 0, & int(N_2/2 \le n \le (N_2 - 1)) \\ \Psi$$
ункция int определена в разд. 8.1.2. (8.18)

Функция па определена в разд. 8.1.2. Для моделирования воздействия (8.18) использовать function-файл input_1

для моделирования воздеиствия (8.18) использовать function-фаил input_1 (см. разд. 8.4.1).

Вывести график воздействия x(n) и два графика реакции y₁(n) с длиной, равной длине свертки L, и длиной, ограниченной до длины воздействия.

Записать формулу свертки.

Пояснить:

- чему равна длина импульса (8.18);
- чему равна длина свертки аналитически и по графику:
- почему ее ограничивают до длины воздействия.

4. Вычисление реакции у₂(n) (идентификатор у2) по разностному уравнению.

Задать воздействие x(n) (8.18). Вывести графики воздействия и реакции.

Сравнить графики реакций $y_1(n)$ (см. п. 3) и $y_2(n)$.

Записать РУ рекурсивного звена 2-го порядка с заданными коэффициентами.

Пояснить, чему равны длины воздействия и реакции.

5. Вычисление параметров передаточной функции в виде произведения простейших множителей.

Вычислить нули, полюсы и коэффициент усиления (идентификаторы q, p и K) передаточной функции (8.17).

Записать нули и полюсы в алгебраической и показательной формах и пояснить связь между ними.

Выразить значение аргумента полюса и нуля относительно π , например, значе-

нию ф =1,7654 будет соответствовать:

$$\varphi = 1,7654 \approx 0,562\pi$$
 8.19)

Представить передаточную функцию в виде произведения простейших множителей с нулями и полюсами в показательной форме.

6. Вычисление параметров передаточной функции в виде произведения множителей второго порядка.

Вычислить коэффициент усиления (идентификатор G) и матрицу коэффициентов (идентификатор s) передаточной функции.

Представить передаточную функцию в виде произведения множителей второго порядка.

7. Вычисление параметров передаточной функции в виде суммы простых дробей.

Вычислить полюсы, коэффициенты разложения и целую часть (идентификаторы p, r и c) передаточной функции.

Записать полюсы и коэффициенты разложения в алгебраической и показательной формах.

Выразить значения аргумента полюса и коэффициента разложения в виде (8.19).

Представить передаточную функцию в виде суммы простых дробей с полюсами и коэффициентами разложения в показательной форме.

8. Вывод карты нулей и полюсов.

Изобразить карту нулей и полюсов.

Пояснить:

• является ли рекурсивное звено устойчивым;

• совпадают ли значения нулей и полюсов с вычисленными в п. 5.

9. Вычисление АЧХ и ФЧХ в шкале нормированных частот.

Вычислить АЧХ и ФЧХ (идентификаторы MAG_w и PHASE_w) в шкале нормированных частот ω (идентификатор w) и вывести их графики.

Сравнить значения полученной АЧХ на границах основной полосы со значениями, вычисленными аналитически по формулам:

$$A(0) = |H(z)||_{z=e^{j_0}=1} = \left|\frac{b_0 + b_1 + b_2}{1 + a_1 + a_2}\right|$$
8.20)

$$A(\pi) = |H(z)||_{z=e^{j\pi}=-1} = \left|\frac{b_0 - b_1 + b_2}{1 - a_1 + a_2}\right|$$
(8.21)
Пояснить:

• чему равны границы основной полосы частот;

• соответствие между картой нулей и полюсов и видом АЧХ;

• какому значению АЧХ соответствует скачок на π, если он имеется;

• какие частотные составляющие воздействия, низкие или высокие, оказались преимущественно подавленными в реакции.

10. Вычисление АЧХ и ФЧХ в шкале абсолютных частот.

Вычислить АЧХ и ФЧХ (идентификаторы MAG и PHASE) в шкале частот f (Гц) (идентификатор f) при заданной частоте дискретизации f_{d} и вывести их графики.

Пояснить:

• чему равны границы основной полосы частот;

• соответствие частотами $\widehat{\omega}$ и f.

11. Описание структуры рекурсивного звена.

Описать четыре разновидности структур рекурсивного звена 2-го порядка (см. табл. 8.2) в виде объектов dfilt с именами Hd1—Hd4.

Пояснить:

- что отображает структура и чем определяется ее вид;
- свойства каждого из объектов dfilt.

12. Анализ влияния нулей и полюсов на вид АЧХ.

В отдельных полях одного графического окна вывести карты нулей и полюсов и соответствующие нормированные AЧХ (идентификатор MAGN) в шкале нормированных частот $\hat{\omega}$ для различных вариантов коэффициентов передаточной функции, представленных в табл. 8.3, которые вычисляются автоматически.

Для одновременного вычисления нормированных АЧХ при четырех вариантах коэффициентов, коэффициенты числителей и знаменателей представить в виде матриц размером 4×3.

Пояснить соответствие между картой нулей и полюсов и видом АЧХ.

Таблица 8.3. Варианты коэффициентов

Ва риант	Векторы коэффициентов передаточной функции		
	числителя	знаменателя	
1	[1 0 0]	[1 a1 a2]	
2	[1 0 0]	[1 -a1 a2]	
3	[1 0 0]	[1 a1 1.2*a2]	
4	[1 1 0]	[1 a1 a2]	

8.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должна быть представлена табл. 8.2 исходных данных для своего номера бригады $N_{\text{бр}}$.

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к script-файлу lr_08 по его имени:

 $>> lr_08$

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбинацию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками не закрывать.

Листинг script-файла lr_08 имеет вид:

>> type lr_08

script

clc

clear

disp('% ЛР №8. ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ')

disp('%')

disp('%')

disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ');

DATA=0;

while DATA==0

```
Nb = input('Nb = '); <u>% НОМЕРБРИГАДЫ</u>
```

b = input('b = '); <u>% ВЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧИСЛИТЕЛЯ</u> <u>ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ</u>

a = input('a = '); <u>% ВЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗНАМЕНАТЕЛЯ</u> <u>ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ</u>

N1 = input('N1 = '); <u>% ДЛИНА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ</u>

N2 = input('N2 = '); <u>% ДЛИНА ВОЗДЕЙСТВИЯ</u>

Fs = input('Fs = '); <u>% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ</u>

```
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
```

disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')

disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод')

```
DATA = input('--> ');
```

end

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp('% п.1. ВЫЧИСЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ — функция impz') disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ГРАФИКА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ нажмите <ENTER>') pause **h1** = impz(b,a,N1); % ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА n = 0:(N1-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ ДЛЯ ИХ figure('Name','Impulse Response','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(n,h1,'fill','MarkerSize',3), grid xlabel('n'), ylabel('h(n)') title('Impulse Response h(n) — impz') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ функция filter') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ нажмите <ENTER>') pause **u0** = [1 zeros(1,(N1-1))]; % ЦИФРОВОЙ ЕДИНИЧНЫЙ ИМПУЛЬС h2 = filter(b,a,u0); % ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА subplot(2,1,2), stem(n,h2,'fill','MarkerSize',3), grid xlabel('n'), vlabel('h(n)'), title('Impulse Response h(n) — filter') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ПО ФОРМУЛЕ СВЕРТКИ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ И РЕАКЦИИ, вычисленной по ФОРМУЛЕ CBEPTКИ, нажмите <ENTER>') pause x = input 1(N2); <u>% ВОЗДЕЙСТВИЕ (ДИСКРЕ</u>ТНЫЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС) у1 = conv(x,h1); <u>% РЕАКЦИЯ ДЛИНЫ, РАВНОЙ Д</u>ЛИНЕ СВЕРТКИ L = N1+N2-1; % ДЛИНА СВЕРТКИ

= 0:(N2-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ ДЛЯ n ВОЗДЕЙСТВИЯ n1 = 0:(L-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ ДЛЯ СВЕРТКИ figure('Name','Input and Output Signals','NumberTitle', 'off') subplot(4,1,1), stem(n,x,'fill','MarkerSize',3), grid, xlabel('n') ylabel('x(n)'), title('Input Signal — Discrete Rectangular Impulse x(n)') subplot(4,1,2), stem(n1,y1,'fill','MarkerSize',3), grid ylabel('y(n)'), title('Output Signal y1(n) — conv (length = L)') subplot(4,1,3), stem(n,y1(1:N2),'fill','MarkerSize',3), grid xlabel('n'), ylabel('y1(n)') title('Output Signal y1(n) (length N2)') = conv disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% вычисление РЕАКЦИИ ПО РАЗНОСТНОМУ п.4. УРАВНЕНИЮ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА РЕАКЦИИ, вычисленной по РАЗНОСТНОМУ УРАВНЕНИЮ, нажмите<ENTER>') pause v2 = filter(b,a,x); % РЕАКЦИЯЛДС subplot(4,1,4), stem(n,y2,'fill','MarkerSize',3), grid xlabel('n'), ylabel('y(n)') title('Output Signal $y_2(n)$ — filter (length = N2)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% ПЕРЕДАТОЧНОЙ п.5. вычисление ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ В ВИДЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОСТЕЙШИХ МНОЖИТЕЛЕЙ') disp('%') disp('%') disp('%Для ВЫВОДА нулей (q) и полюсов (p) В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ и коэффициента усиления (K) нажмите <ENTER>')

pause [q,p,K] = tf2zpk(b,a) % НУЛИ (q) И ПОЛЮСЫ (p) В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ И КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ (К) disp('%')disp('%Для ВЫВОДА нулей (q) в ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ ФОРМЕ нажмите <ENTER>') pause disp('% rq — РАДИУСЫ, wq — АРГУМЕНТЫ нулей') **rq** = abs(q) % РАДИУСЫ КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ НУЛЕЙ wq = angle(q) <u>% АРГУМЕНТЫ</u> КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ НУЛЕЙ disp('%Для ВЫВОДА полюсов (р) в ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ ФОРМЕ нажмите <ENTER>') pause disp('% rp — РАДИУСЫ, wp — АРГУМЕНТЫ полюсов') **rp** = abs(p) % РАДИУСЫ КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛЮСОВ **wp** = angle(p) <u>% APГУМЕНТЫ КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛЮ</u>СОВ disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ п.6. вычисление ФУНКЦИИ В ВИДЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ МНОЖИТЕЛЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА') disp('%') disp('%') disp('% Для ВЫВОДА матрицы коэффициентов (s) и коэффициента усиления (G) нажмите <ENTER>') pause [s,G] = tf2sos(b,a) % КОЭФФИЦИЕНТЫ (s) И КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ (G) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% ПЕРЕДАТОЧНОЙ п.7. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ В ВИДЕ СУММЫ ПРОСТЫХ **ЛРОБЕЙ'**)

disp('%') disp('%') disp(1% Для ВЫВОДА коэффициентов разложения (r), полюсов (р) и целой части (с) нажмите <ENTER>') pause $[\mathbf{r},\mathbf{p},\mathbf{c}] = \text{residuez}(\mathbf{b},\mathbf{a}) \%$ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАЗЛОЖЕНИЯ (r) и ПОЛЮСЫ (p) В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ И ЦЕЛАЯ ЧАСТЬ (с) disp('%') disp('%Для ВЫВОДА КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ (r) В ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ ФОРМЕ нажмите <ENTER>') pause rr = abs(r) % РАДИУСЫ КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ (r) % АРГУМЕНТЫ КОМПЛЕКСНО СОПРЯЖЕННЫХ wr angle(r) = КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ (r) disp('%') disp('%')disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.8. ВЫВОД КАРТЫ НУЛЕЙ И ПОЛЮСОВ') disp('%') disp('%') disp('% Для ВЫВОДА КАРТЫ НУЛЕЙ И ПОЛЮСОВ нажмите <ENTER>') pause figure('Name',' Z-plane zero-pole plot','NumberTitle', 'off') zplane(b,a), title('Z-plane zero-pole plot'), grid xlabel('Re'), ylabel('jIm') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.9.ВЫЧИСЛЕНИЕ АЧХ и ФЧХ В ШКАЛЕ НОРМИРОВАННЫХ **HACTOT'**)

disp('%')disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ и ФЧХ в шкале НОРМИРОВАННЫХ частот нажмите <ENTER>') pause w = 0:pi/100:pi; % ВЕКТОР НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ (РАД) **H** $\mathbf{w} = \text{freqz}(b,a,w);$ % КОМПЛЕКСНАЯ ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА **MAG** w = abs(H w); % AYX**PHASE** $w = angle(H w); \% \Phi \Psi X$ figure('Name', 'Magnitude and Phase Responses', 'NumberTitle', 'off') subplot(2,2,1), plot(w,MAG w), grid, xlabel('w (rad)'), title('MAGNITUDE — |H(w)|subplot(2,2,3), plot(w,PHASE w), grid, xlabel('w (rad)'), title('PHASE — arg [H(w)] (rad)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp(1% п.10. ВЫЧИСЛЕНИЕ АЧХ и ФЧХ В ШКАЛЕ АБСОЛЮТНЫХ **'HACTOT'**) disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ и ФЧХ в шкале АБСОЛЮТНЫХ частот нажмите <ENTER>') pause $\mathbf{f} = 0$:Fs/100:Fs/2; % ВЕКТОР АБСОЛЮТНЫХ ЧАСТОТ (Гц) H = freqz(b,a,f,Fs); % КОМПЛЕКСНАЯ ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА MAG = abs(H); % A4X**PHASE** = angle(H); $\% \Phi \Psi X$ subplot(2,2,2), plot(f,MAG), grid, xlabel('f (Hz)'), title('MAGNITUDE ----|H(f)|'subplot(2.2.4), plot(f,PHASE), grid, xlabel('f (Hz)'), title('PHASE — arg [H(f)] (rad)') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')

disp('% п.11. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ РЕКУРСИВНОГО ЗВЕНА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ dfilt нажмите <ENTER>') pause **Hd1** = dfilt.df1(b,a) % ПРЯМАЯСТРУКТУРА (Direct-Form I) Hd2 = dfilt.df2(b,a) % ПРЯМАЯ КАНОНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА (Direct-Form II) Hd3 = dfilt.dflt(b,a) % ПРЯМАЯ ТРАНСПОНИРОВАННАЯ СТРУКТУРА (Direct-Form I Transposed) Hd4 = dfilt.df2t(b,a) % ПРЯМАЯ КАНОНИЧЕСКАЯ ТРАНСПОНИРОВАННАЯ СТРУКТУРА (Direct-Form I Transposed) disp('% Дляпродолжениянажмите<ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.12. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НУЛЕЙ И ПОЛЮСОВ НА ВИД АЧХ') disp('%') disp('%') **b(1,:)** = [1 0 0]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ — 1-я СТРОКА МАТРИЦЫ **b(2,:)** = [1 0 0]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ — 2-я СТРОКА МАТРИШЫ **b(3,:)** = [1 0 0]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ — 3-я СТРОКА МАТРИЦЫ **b(4,:)** = [1 1 0]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ — 4-я СТРОКА МАТРИЦЫ а(1,:) = а; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ — 1-я СТРОКА МАТРИЦЫ **а(2,:)=[1 -а(1,2) а(1,3)];** % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ — 2-я СТРОКА МАТРИЦЫ а(3,:)=[1 а(1,2) 1.2*а(1,3)]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ — 3-я СТРОКА МАТРИЦЫ a(4,:)=[1 a(1,2) a(1,3)]; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ — 4-я СТРОКА МАТРИЦЫ w = 0:pi/100:pi; % ВЕКТОР НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ (РАД) **for i=**1:4 H3(:,i) = freqz(b(i,:),a(i,:),w); %ЧАСТОТНАЯХАРАКТЕРИСТИКА — iйСТОЛБЕЦ МАТРИЦЫ **MAG3(:,i)** = abs(H3(:,i)); MAX(:,i) = max(MAG3(:,i)); % АЧХ — i-йСТОЛБЕЦ МАТРИЦЫ — И МАКСИМУМ АЧХ

MAGN(:,i) = MAG3(:,i)/MAX(:,i); <u>% НОРМИРОВАННАЯ АЧХ — i-й</u> СТОЛБЕЦ МАТРИЦЫ end disp('% Для вывода КАРТЫ НУЛЕЙ И ПОЛЮСОВ и НОРМИРОВАННОЙ AЧX нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Z-plane zero-pole plots and Normalized Magnitudes', 'NumberTitle', 'off') **for i** = 1:4 subplot(4,2,2*i-1), zplane(b(i,:),a(i,:)), title('Z-plane zero-pole plot'), grid xlabel('Re'), ylabel('jIm') subplot(4,2,2*i), plot(w,MAGN(:,i)), grid xlabel('w (rad)'), title('Normalized Magnitude A(w)') end disp('%') disp('%')

```
disp('% РАБОТА ЗАВЕРШЕНА')
```

8.4.1. Используемые внешние функции

В script-файлеlr_08 используется внешняя функция input_1, предназначенная для

моделирования воздействия (8.18):

```
function x = input_1(N)
```

```
%Формирование воздействия x длины N
for n = 0:(N-1)
if n < round(N/2)
x(n+1) = 1;
else
x(n+1) = 0;
end
end
```

8.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании functionфайлов для моделирования и анализа характеристик двух рекурсивных звеньев 2-го порядка.

В качестве исходных данных использовать коэффициенты передаточной функции (8.17) для своего номера бригады N_{6p} и следующего за ним; для номера бригады N_{6p} =30 второй вариант соответствует N_{6p} =1.

При создании function-файлов представить коэффициенты числителей и знаменателей звеньев в виде двух матриц размером 2×3 (см. аналогично в п. 12 script-файла) и организовать ввод строк каждой из матриц с клавиатуры.

Пункты самостоятельного задания включают в себя:

1С. Вычисление и вывод графиков ИХ двух рекурсивных звеньев.

Для вычисления ИХ использовать функцию filter. Задать большую длину воздействия, например 1000, и определить длину ИХ N_1 исходя из условия достижения заданной точности $\varepsilon = 10^{-3}$ (итерационный цикл):

$$||h(n)| - |h(n-1)|| \le E, n = 0, 1, \dots, 999$$
 (

2С. Вычисление реакции двух рекурсивных звеньев по формуле свертки на воздействие x(n):

$$x(n) = \begin{cases} U, n0 \le n \le (n0 + nimp - 1) \\ 0, 0 \le n \le n0; (n0 + nimp) \le n \le (N - 1) \end{cases}$$
(8.23)

Исходные данные для воздействия (8.23) заданы в табл. 7.1.

Ограничить реакции до длины воздействия и вывести графики воздействия и реакций.

3С. Вычисление реакции двух рекурсивных звеньев по РУ на воздействие x (n) (8.23).

Вывести графики воздействия и реакций.

Описать прямую и прямую каноническую структуры рекурсивных звеньев в виде объектов dfilt.

4C. Вычисление АЧХ двух рекурсивных звеньев в шкале нормированных частот $\hat{\omega}$

В отдельных полях одного графического окна вывести карты нулей и полюсов и АЧХ рекурсивных звеньев.

8.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения каждого пункта задания, включая копируемые из окна Command Window результаты вычислений (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Дайте определение ИХ.
- 2. Запишите формулу свертки.
- 3. Поясните, как в формуле свертки учитываются ННУ.
- 4. Запишите РУ общего вида.
- 5. Поясните, как в РУ учитываются ННУ.
- 6. Дайте определение рекурсивных и нерекурсивных ЛДС.

7. Поясните принципиальное отличие ИХ рекурсивных и нерекурсивных ЛДС.

8. Приведите тождественные названия рекурсивных и нерекурсивных ЛДС.

- 9. Дайте определение передаточной функции.
- 10. Запишите общий вид передаточной функции рекурсивной ЛДС.

11. Приведите основные разновидности передаточной функции рекурсивной ЛДС.

- 12. Запишите передаточную функцию нерекурсивной ЛДС.
- 13. Что такое нули и полюсы ЛДС?
- 14. Что такое карта нулей и полюсов?
- 15. Дайте определение устойчивости ЛДС.
- 16. Как определить, является ли ЛДС устойчивой?
- 17. Дайте определения АЧХ и ФЧХ.

18. Поясните связь частотной характеристики с передаточной функцией.

- 19. Перечислите основные свойства АЧХ и ФЧХ.
- 20. Приведите определение и поясните смысл нормированной частоты

ώ.

- 21. В какой полосе частот и почему рассчитывают АЧХ и ФЧХ?
- 22. Чем определяется местоположение максимумов АЧХ?
- 23. Чем определяется местоположение минимумов АЧХ?
- 24. Чем определяется местоположение нулей АЧХ?
- 25. В каких точках ФЧХ имеет скачок на π?
- 26. Что отображает структура ЛДС и чем определяется ее вид?

27. Назовите четыре разновидности структур рекурсивного звена 2-го

порядка.

Лабораторная робота №4

Дискретное преобразование Фурье (часть 1)

Цель работы: изучить дискретное преобразование Фурье (ДПФ) периодических последовательностей и последовательностей конечной длины и овладеть программными средствами его вычисления в MATLAB с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ).

9.1. Краткая теоретическая справка

В гл. 7 мы познакомились с описанием дискретных сигналов во временной области. Для описания дискретных сигналов в частотной области используется дискретное преобразование Фурье.

9.1.1. Дискретное преобразование Фурье

Дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) называется пара взаимно однозначных преобразований:

прямоеДПФ (Discrete Fourier Transform — DFT):

$$X(k)\sum_{n=0}^{N-1} x(n)WN, k = 0, 1, ..., N - 1;$$
9.1)

ОбраноеДПФ(ОДПФ) (Inverse Discrete Fourier Transform — IDFT):

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) WN, n = 0, 1, \dots, N-1,$$
9.2)

где п — дискретноенормированноевремяn = nT/T; k — дискретная нормированная частота $k = k\Delta\omega/\Delta\omega$; $\Delta\omega = \omega_{\rm d}/N = 2\pi/NT$ — период дискретизации по частоте (*разрешение по частоте*); x(n) — N-точечная последовательность, т. е. периодическая последовательность во временной области с периодом N; X (k) — N-точечное ДПФ, т. е. периодическая последовательность в частотной области

с периодом N; N — период последовательности и ДПФ;

 $W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$ поворачивающий множитель;

 $X(k)W_N^{-nk} = X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}nk} - k$ -я дискретная гармоника.

Значения абсолютных частот дискретных гармоник связаны со значениями дискретных нормированных частот соотношением:

$$f = k f_{\rm A}/N \tag{9.3}$$

Дискретное преобразование Фурье (9.1) трактуется по-разному в зависимости от вида последовательности х (n) — периодическая с периодом N или конечная длины N.

Для периодической последовательности x(n) с периодом N ДПФ X(k) (9.1) представляет собой ее спектр с точностью до множителя 1/N.

Модуль ДПФ |X(k)| (с точностью до множителя 1/N) называют амплитудным спектром, а аргумент $\arg\{X(k)\}$ — фазовым спектром периодической последовательности.

Амплитудный спектр вещественной периодической последовательности равен модулю ДПФ |X(k)| с точностью до множителя:

$$\begin{cases} 1/N, k = 0 \\ 2/N, k \neq 0 \end{cases}$$
 9.4)

При вычислении ДПФ (9.1) периодической последовательности она может задаваться на периоде N или на целом числе периодов N, что не меняет результата.

Для конечной последовательности x(n) длины N ДПФ X(k) (9.1) представляет собой N дискретных равноотстоящих значений ее спектральной плотности $X(e^{j\omega T})$ на периоде $\omega_{\pi} = 2\pi/T$ (см. разд. 9.2.3).

Для вещественных последовательностей, периодических и конечных, модуль ДПФ |X(k)| — четная, а аргумент $arg\{X(k)\}$ — нечетная функция частоты k.

Согласно определению, при вычислении ДПФ предполагается, что последовательность x(n) является периодической, и конечная последовательность представляет собой один период периодической последовательности.

При этом точное выделение гармоник последовательности x(n) с частотами f_i гарантируется только в том случае, если они кратны периоду дискретизации по частоте $\Delta = f f_{\pi}/N$:

$$f_i = \Delta q f, q = 0, 1, \dots, (N-1)$$
 9.5)

что, в свою очередь, возможно только в том случае, если на интервале NT последовательности x(n) укладывается целое число периодов T_i , т. е. отношение

$$P_i = \frac{NT}{T_i} = \frac{Nf_i}{f_{\rm A}} \tag{9.6}$$

является целым числом.

В случае, если условие (9.5) не выполняется, наблюдается эффект растекания спектра, который рассматривается в разд. 10.1.1.

В МАТLАВ ДПФ (9.1)—(9.2) вычисляется с использованием алгоритмов БПФ¹ и ОБПФ с помощью функций:

$$X = fft(x)$$
$$x = ifft(X)$$

где х и X — N-точечные последовательность x(n) и ее ДПФ X(k) — векторы, нижняя граница индексов которых равна единице, в отличие от ДПФ (9.1)—(9.2), где она равна нулю.

¹ Выбор конкретного алгоритма БПФ скрыт от пользователя и осуществляется автоматически в зависимости от длины исходной последовательности.

9.1.2. Выделение дискретных гармоник полезного сигнала

При вычислении ДПФ часто ставится задача автоматического определения значений модуля ДПФ |X(k)|,превосходящих некоторый заданный порог є, и соответствующих дискретных нормированных частот k. Фактически, эта задача сводится к выделению полезного сигнала в его аддитивной смеси с шумом.

В учебных целях мы ограничимся рассмотрением двух наиболее простых критериев, согласно которым значение модуля ДПФ |X(k)| аддитивной смеси сигнала с шумом относят к полезному сигналу:

% первый критерий — при заданном пороге ε₁ значение модуля ДПФ |X(k)| относят к полезному сигналу, если выполняется условие:

$$\frac{|X(k)|}{\max|X(k)|} > \varepsilon 1; \tag{9.7}$$

 \mathfrak{S} второй критерий — при заданном пороге ε_2 значение модуля ДПФ |X(k)|относят к полезному сигналу, если выполняется условие:

$$\frac{|X(k)|^2}{Pcp} > \varepsilon^2 \tag{9.8}$$

где P_{ср} — средняя мощность аддитивной смеси сигнала с шумом:

$$Pcp = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2$$
9.9)

Значение порога ε_1 в первом критерии (9.7) задается в пределах:

$$\frac{\max|X(k)_{\text{шума}}|}{\max|X(k)|} < \varepsilon_1 < 1 \tag{9.10}$$

а порога ε_2 во втором критерии (9.8) — в пределах:

$$\frac{\min|X(k)\operatorname{CMFH}|^2}{Pcp} < \varepsilon 2 \le \frac{\max|X(k)^2|}{Pcp} \qquad \qquad 9.11)^{(1)}$$

при условии, что

$$|X(k)_{\text{сигн}}| > max |X(k)_{\text{шума}}|$$
9.12)

Граничные значения порогов в (9.10) и (9.11) можно определить только при априорно известных сигнале и шуме либо их моделях.

При обработке реальных сигналов значение порога ε₁ или ε₂ задается исходя из требований конкретной задачи.

9.1.3. Восстановление спектральной плотности

Спектральная плотность конечной последовательности x(n) длины N:

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega Tn}$$

$$9.13)$$

на периоде $\omega = \pi_{\mu} 2/T$ связана с отсчетами ДПФ X(k) (9.1) соотношением: $X(k) = X(e^{j\omega T})|_{\omega = k\frac{2\pi}{NT}}, k=0, 1, ..., N-1.$ (

Значения спектральной плотности (9.13) в L равноотстоящих точках на периоде ω при L N> определяются по формуле:

$$X\left(e^{j\frac{2\pi}{L}l}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{L}ln}, l = 0, 1, \dots, L-1$$
9.15)

где 1 — дискретная нормированная частота, а $\Delta \omega$ — период дискретизации по частоте:

$$\Delta \omega = \omega g/L = 2\pi/LT \qquad 9.16$$

Тот же результат будет получен, если конечную последовательность x(n)длины N дополнить нулями до длины L:

$$\tilde{x}(n) = \begin{cases} x(n), 0 \le n \le (N-1) \\ 0, N \le n \le (L-1) \end{cases}$$

ти ее ДПФ (9.1), заменяя N на L:

и найт ; дпф (9.1),

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} \tilde{x}(n) W_L^{nk}, k = 0, 1, \dots, L-1$$
9.18)
(9.18)

С учетом (9.17) формула (9.18) принимает вид (сравните с (9.15)):

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_L^{nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2k}{L}kn}, k = 0, 1, \dots, L-1$$

Следует помнить, что разрешение по частоте, под которым понимают минимальное расстояние между дискретными гармониками ДПФ, В определяется исключительно периодом дискретизации по частоте $\Delta f = f_{\pi}/N$ и фиксированной частоте f_{π} зависит только от длины (периода) при последовательности, поскольку именно она и только она определяет спектральный состав (дискретные гармоники) последовательности.

Поэтому увеличение длины конечной последовательности за счет добавления

(L-N) нулей и, соответственно, уменьшение периода дискретизации по частоте

до $\Delta = f f_{\pi}/L$, не меняет разрешения по частоте, а лишь улучшает условия различения близко расположенных частот дискретных гармоник. Решение этой задачи рассматривается в разд. 10.1.2.

9.1.4. Восстановление аналогового сигнала

Дискретное преобразование Фурье X(k) (9.1) может использоваться для восстановления аналогового периодического сигнала с финитным спектром, расположенным в области $(-N/2) \le k \le (N/2-1)$, по формуле (усеченный ряд Фурье):

9.14)

¹При N — четном, и в области $-(N-1)/2 \le k \le (N-1)/2$ — при N нечетном.

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} Xa(k) e^{j\frac{2\pi}{NT}kt}$$
(9.19)

где отсчеты X_a(k) связаны с отсчетами ДПФ X(k) соотношением:

$$X_a(k) = \begin{cases} X(N+k), & -N/2 \le k \le -1; \\ X(k), & 0 \le k \le (N/2 - 1) \end{cases}$$
(9.20)

Тот же результат будет получен при восстановлении аналогового сигнала непосредственно с помощью усеченного ряда Котельникова:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]}{\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)}$$

$$9.21)$$

В МАТLАВ для этого удобно воспользоваться функцией: sinc(t/T-n)

9.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с вычислением ДПФ периодических и конечных последовательностей и применением ДПФ для выделения полезного сигнала в аддитивной смеси с шумом, восстановления аналогового сигнала и спектральной плотности конечной последовательности с использованием программных средств MATLAB.

9.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файла lr_09 и functionфайлов fft_e1 и fft_e2, которые хранятся на прилагаемом компакт-диске в папке

LAB_DSP\LAB_09.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_09 по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 9.1 для номера бригады

 $N_{\delta p},$ где $N_{\delta p}$ =1, 2, ...,30 . Функция $N_{\delta p} \,mod \; M$ в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{\delta p}$ по модулю M .

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables_Tables_09 хранятся табл. 9.1 исходных данных и пример ее заполнения для N_{бр}=1.

Перем енная	Назначение	Зна чение	Идентифи катор
$N_{\delta p}$	Номер бригады	$N_{\delta p}$	Nb =
Ν	Период (длина) последовательности	N= 64	N = 64
$f_{\scriptscriptstyle \! m I}$	Частота дискретизации	<i>f</i> д = 2000(N _{бр}	Fs =

Таблица 9.1. Таблица исходных данных

	mod 5 +	
	1)	

Таблица 9.1 (окончание)

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
Т	Период дискретизации	$T = 1/f_{\pi}$	1/Fs
A ₁	Амплитуды дискретных	$A_1 = +1$ 0,01N _{6p}	A1 =
A_2	гармоник	$A_2 = 2A_1$	A2 =
f_1	Частоты	$fl = f\partial/8$	f1 =
	дискретных		
	гармоник		

Задание на лабораторную работу связано с вычислением ДПФ и включает в себя следующие пункты:

1. Вычисление амплитудного и фазового спектров периодической последовательности.

Вычислить амплитудный и фазовый спектры периодической последовательности x (n) (идентификатор x) с периодом N:

$$x(nT) = A_1 \cos(2\pi f_1 nT + \pi/4) + A_2 \cos(2\pi f_2 nT + \pi/8)$$
 9.22)

используя ее тождественное представление в виде: (9.23)

$$\begin{aligned} x(n) &= A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_{\pi}}n + \frac{\pi}{4}\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_{\pi}}n + \frac{\pi}{8}\right) \\ &= A_1 \cos\left(\widehat{\omega}_1 n + \frac{\pi}{4}\right) + A_2 \cos\left(\widehat{\omega}_2 n + \frac{\pi}{8}\right) \end{aligned} 9.23) \end{aligned}$$

Вывести графики последовательности x(n) (9.23) на периоде N:

• в шкале дискретного нормированного времени n (идентификатор n);

в шкале дискретного времени nT (идентификатор nT).

Вычислить ОДПФ от ДПФ последовательности x(n) и вывести график полученной последовательности в шкале дискретного нормированного времени.

Вычислить амплитудный (идентификатор MOD) и фазовый ¹ (идентификатор PHASE) спектры последовательности x(n) (9.23) с учетом (9.4) и вывести их графики:

¹ Если модуль ДПФ меньше заданного, близкого к нулю, порога, то значения фазового спектра следует обнулить. В противном случае отношение малых, сравнимых с нулем, мнимой и вещественной частей может существенно отличаться от нуля, что обусловлено спецификой вычислений в MATLAB.

• в шкале дискретных нормированных частот k (идентификатор k);

в шкале абсолютных частот f (Гц) (идентификатор f).

Пояснить:

• связь дискретного нормированного времени с дискретным временем;

• связь частоты f (Гц) с дискретной нормированной частотой;

• вид амплитудного и фазового спектров.

2. Вычисление ДПФ конечной последовательности.

Вычислить ДПФ конечной последовательности $x(n) \, (9.23)$ длины N .

Вывести графики в шкале дискретных нормированных частот:

• модуля ДПФ (идентификатор MOD_K) конечной последовательности;

• амплитудного спектра периодической последовательности (см. п. 1).

Пояснить связь модуля ДПФ конечной последовательности с амплитудным спектром периодической последовательности.

3. Определение амплитуд и частот дискретных гармоник.

Для автоматического определения амплитуд и частот гармоник в амплитудном спектре периодической последовательности x(n) (9.23) использовать functionфайл fft_e1 (см. разд. 9.4.1), задавая малое, сравнимое с нулем, значение порога $\varepsilon_1 = 10^{-7}$ (идентификатор e1).

Вывести:

выходные параметры function-файла fft_e1;

• значения амплитуд, дискретных нормированных частот и абсолютных частот (Гц) гармоник.

Пояснить:

смысл выходных параметров function-файла fft_e1;

• соответствие между значениями дискретных нормированных частот и абсолютных частот гармоник.

4. Граничные значения порогов для первого (9.7) и второго (9.8) критериев выделения полезного сигнала.

Сформировать аддитивную смесь s(n) (идентификатор s) полезного периодического сигнала x(n) (9.23) с нормальным белым шумом r(n) с нулевым средним значением и единичной дисперсией:

$$s(n) = x(n) + r(n).$$
 9.24)

Для аддитивной смеси s(n) (9.24) определить:

• граничные значения порога ε₁ для первого критерия (9.7) (идентификаторы e1_low и e1_up);

• граничные значения порога ε₂ для второго критерия (9.8) (идентификаторы e2_low и e2_up).

Пояснить, как рассчитываются граничные значения порогов ε_1 и ε_2 .

5. Выделение полезного сигнала по первому критерию.

Вывести графики:

аддитивной смеси s(n) (9.24) на периоде N;

• амплитудного спектра аддитивной смеси s(n) в шкале дискретных нормированных частот;

• амплитудного спектра аддитивной смеси s(n), нормированного к его максимальному значению (см. (9.7)).

Этот график позволяет уточнить значение порога ε_1 в диапазоне его граничных значений, определенных в п. 4.

Ввести значение порога ε₁.

Для выделения полезного сигнала по первому критерию (9.7) использовать function-файл fft_e1 (см. разд. 9.4.1).

Вывести выходные параметры function-файла fft_e1.

Пояснить:

• какое значение порога ε_1 было выбрано и чем обоснован выбор;

• смысл выходных параметров function-файла fft e1;

• какие амплитуды гармоник соответствуют полезному сигналу согласно первому критерию (9.7);

• в каком случае применение первого критерия будет неэффективным.

6. Выделение полезного сигнала по второму критерию.

Вывести графики:

• амплитудного спектра аддитивной смеси s(n) (9.24) в шкале дискретных нормированных частот;

• квадрата амплитудного спектра аддитивной смеси s(n), нормированного к ее средней мощности (см. (9.8)).

Этот график позволяет уточнить значение порога ε_2 в диапазоне его граничных значений, определенных в п. 4.

Ввести значение порога ε₂.

Для выделения полезного сигнала по второму критерию (9.8) использовать function-файл fft_e2 (см. разд. 9.4.1).

Вывести выходные параметры function-файла fft_e2.

Пояснить:

• какое значение порога ε₂ было выбрано и чем обоснован выбор;

• смысл выходных параметров function-файла fft_e2;

• какие амплитуды гармоник соответствуют полезному сигналу согласно второму критерию (9.8);

• в каком случае применение второго критерия будет неэффективным.

7. Восстановление аналогового сигнала.

Восстановить периодический аналоговый сигнал x(t) (идентификатор xa) по отсчетам ДПФ X(k) периодической последовательности x(n) (9.23). Для вычисления значений сигнала x(t) использовать формулу (9.19), задавая

значения времени t (идентификатор t) на интервале t \in [0;(N-1)]T с шагом $\Delta t = 0,25T$.

В тех же точках вычислить значения исходного аналогового сигнала $x_{\mu cx}(t)$ (идентификатор xt), на основе которого получена последовательность x (nT)

(9.22):

$$x_{\mu cx}(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \pi/4) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \pi/8)$$
9.25)

Вывести графики:

периодической последовательности х (n) (9.23) и модуля ее ДПФ;

• восстановленного аналогового сигнала x(t) и его амплитудного спектра (идентификатор MODa);

исходного аналогового сигнала x_{исх}(t) (9.25).

Пояснить:

• связь модуля ДПФ последовательности со спектром аналогового сигнала;

• результат визуального сравнения восстановленного и исходного сигналов.

^{8.} Восстановление спектральной плотности конечной последовательности.

Вычислить значения спектральной плотности конечной последовательности x(n) (9.23) длины N в L N=2 точках на периоде $\tilde{\omega}_{d} = 2\pi$ двумя способами:

• по формуле (9.15) — идентификатор XW;

по формуле (9.18) — идентификатор XZ.

Вывести графики:

• модуля ДПФ конечной последовательности x(n) (см. п. 2) в шкале дискретных нормированных частот с помощью функции stem;

• модулей спектральной плотности, вычисленной первым и вторым способами в шкале частот $\widehat{\omega}$ (идентификатор w) с помощью функции plot.

Пояснить:

связь между ДПФ и спектральной плотностью;

• алгоритмы вычисления значений спектральной плотности по формулам (9.15) и (9.18);

• соответствие между частотами $\hat{\omega}$ (рад) пиков спектральной плотности и их дискретными нормированными частотами.

9. Уменьшение периода дискретизации по частоте при вычислении ДПФ.

Сформировать три конечные последовательности x(n) (9.23) (вектор xz) с длинами L=N, 2N, 4N (вектор L), дополняя их нулями до длины L при L>N.

Вычислить ДПФ X(k) (9.18) данных последовательностей (вектор XZ). Вывести графики:

• исходной последовательности и последовательностей, дополненных нулями;

• их модулей ДПФ в шкале дискретных нормированных частот (пунктиром с помощью функции stem) и одновременно — восстановленных спектральных плотностей (с помощью функции plot красным цветом).

Для сравнения графиков удобно воспользоваться кнопкой Zoom in на панели инструментов.

Вывести значения периодов ДПФ (вектор L) и соответствующих им периодов дискретизации по частоте (вектор Delta_f).

Пояснить:

- причину изменения периода дискретизации по частоте;
- изменяется ли при этом разрешение по частоте;
- чему равно разрешение по частоте;
- с какой целью уменьшают период дискретизации по частоте.

9.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должна быть представлена табл. 9.1 исходных данных для своего номера бригады N_{бр}.

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к script-файлу lr_09 по его имени:

 $>> lr_09$

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбинацию клавиш <Ctrl>+<Break>.

Листинг script-файла lr_09 имеет вид:

```
>> type lr 09
script
clc
clear
disp('% ЛР №9. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ (часть 1)')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ');
DATA=0;
while DATA==0
Nb = input('Nb = '); % НОМЕР БРИГАДЫ
N = input('N = '); % ДЛИНА (ПЕРИОД) ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
Fs = input('Fs = '); <u>% ЧАСТОТА</u> ДИСКРЕТИЗАЦИИ
T = input('T = '); % ПЕРИОД ДИСКРЕТИЗАЦИИ 1/Fs
A1 = input('A1 = '); % АМПЛИТУДЫ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
A2 = input('A2 = ');
f1 = input('f1 = '); % ЧАСТОТЫ (Гц) ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
f2 = input('f2 = ');
```

```
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('% Для вывода ИСХОДНЫХ АМПЛИТУД и ЧАСТОТ ДИСКРЕТНЫХ
ГАРМОНИК нажмите
<ENTER>')
pause
disp('\%')
disp(['A1 = 'num2str(A1) 'A2 = 'num2str(A2)])
disp([' f1 = ' num2str(f1) ' f2 = ' num2str(f2)])
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.1. ВЫЧИСЛЕНИЕ АМПЛИТУДНОГО И ФАЗОВОГО
СПЕКТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ периодической последовательности нажмите
<ENTER>')
pause
n = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
\mathbf{k} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
w1 = 2*pi*f1/Fs; w2 = 2*pi*f2/Fs; % НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
(РАД)
```

x = A1*cos(w1*n+pi/4)+A2*cos(w2*n+pi/8); <u>% ПЕРИОДИЧЕСКАЯ</u><u>ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ</u><math>X = fft(x); <u>% ДПФ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ</u>**МОD**= (2/N)*abs(X); <u>% АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ</u><u>ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ</u>

MOD(1) = (1/N)*abs(X(1));PHASE = angle(X); % Φ АЗОВЫЙ СПЕКТР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ **for i** = 1:N **if** (abs(X(i)) < 1e-4)PHASE(i)=0; end end figure('Name','Periodic Sequence','NumberTitle','off') subplot(3,1,1), stem(n,x, 'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('n') ylabel('x(n)'), title(strcat(['Periodic Sequence x(n) N = ',num2str(N)])) subplot(3,1,2), stem(n/Fs,x,'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('nT') vlabel('x(nT)'), title(strcat(['Periodic Sequence x(nT) N = '.num2str(N)])) $\mathbf{x} = ifft(\mathbf{X}); \%$ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ОДПФ subplot(3,1,3), stem(n,x,'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('n') vlabel(x(n)), title(strcat([Periodic Sequence x = ifft(X) N =(,num2str(N)]))disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА периодической последовательности нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Amplitude Spectrum','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MOD,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('1/N|X(k)|')title(streat(['Amplitude Spectrum of the Periodic Sequence N = (.num2str(N))) subplot(2,1,2), stem(k*(Fs/N),MOD,'MarkerSize',3,'Linewidth',2),grid xlabel('f (Hz)'), ylabel('1/N|X(f)|') title(strcat(['Amplitude Spectrum of the Periodic Sequence N = (.num2str(N))) disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ФАЗОВОГО СПЕКТРА периодической последовательности нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Phase Spectrum','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k, PHASE,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('arg{X(k)} (rad)')

title(streat(['Phase Spectrum of the Periodic Sequence N = (num2str(N))) subplot(2,1,2), stem(k*(Fs/N),PHASE,'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('f (Hz)'), ylabel('arg{X(f)} (rad)') title(streat(['Phase Spectrum of the Periodic Sequence N = ',num2str(N)])) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ДПФ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ МОДУЛЯ ДПФ конечной последовательности и АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА') disp('% периодической последовательности нажмите <ENTER>') pause **MOD** K = abs(fft(x)); % MOДУЛЬ ДПФ КOHEЧHOЙПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ figure('Name', 'DFT Modulus and Amplitude Spectrum', 'NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MOD K,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('|X(k)|') title('DFT Modulus of the Finite Sequence') subplot(2,1,2), stem(k,MOD,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), vlabel('1/N |X(k)|') title('Amplitude Spectrum of the Periodic Sequence') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК') disp('%') disp('%')disp('% Для вывода ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ fft e1 нажмите <ENTER>') pause e1 = 1e-7; % ЗНАЧЕНИЕ ПОРОГА ДЛЯ ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ [MODm,m] = fft e1(MOD,e1) % ВНЕШНЯЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ

ГАРМОНИК ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПО ПЕРВОМУ КРИТЕРИЮ

```
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода АМПЛИТУД и ЧАСТОТ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
нажмите <ENTER>')
pause
A1 = MODm(1); A2 = MODm(2); % АМПЛ<u>ИТУДЫ ДИСКРЕТНЫХ</u>
ГАРМОНИК
k1 = m(1); k2 = m(2); \% ДИСКРЕТНЫЕ НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
f1 = k1*Fs/N; f2 = k2*Fs/N; % ЧАСТОТЫ (Гц) ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
disp('%')
disp('%')
disp(['A1 = 'num2str(A1) 'A2 = 'num2str(A2)])
disp(['k1 = 'num2str(k1) 'k2 = 'num2str(k2)])
disp([' f1 = ' num2str(f1) ' f2 = ' num2str(f2)])
disp('%')
disp('%')
disp('% СРАВНИТЕ с ВЫХОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ функции fft e1 и
исходными данными')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. ГРАНИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОРОГОВ ДЛЯ ПЕРВОГО И
ВТОРОГО КРИТЕРИЕВ
ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода граничных значений порога для ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ
нажмите
<ENTER>')
pause
noise = randn(1,N); <u>% НОРМАЛЬНЫЙБ</u>ЕЛЫЙШУМ
s = x+noise; % АДДИТИВНАЯ СМЕСЬ СИГНАЛА С ШУМОМ
S = fft(s); % ДПФ СМЕСИ СИГНАЛА С ШУМОМ
MODS = (2/N)*abs(S); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР СМЕСИ СИГНАЛА С
ШУМОМ
MODS(1) = (1/N)*abs(S(1));
NOISE = fft(noise); % ДПФ ШУМА
MODNOISE = (2/N)*abs(NOISE); <u>% АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР Ш</u>УМА
```

```
MODNOISE(1) = (1/N)*abs(NOISE(1));
MAX NOISE = max(MODNOISE); % МАКСИМУМ АМПЛИТУДНОГО
СПЕКТРА ШУМА
MAXS= max(MODS); % МАКСИМУМ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА СМЕСИ
СИГНАЛА С
ШУМОМ
e1 low= MAX NOISE/MAXS; % НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ПОРОГА ДЛЯ
ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ
e1 up= 1; % ВЕРХНЯЯ ГРАНИЦА ПОРОГА ДЛЯ ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ
P = (1/N)*sum(MODS.^2); % СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ СМЕСИ СИГНАЛА С
ШУМОМ
MAXS2 = MAXS.^{2}; % КВАДРАТ МАКСИМУМА АМПЛИТУДНОГО
СПЕКТРА СМЕСИ СИГНАЛА
С ШУМОМ
MAX NOISE2 = MAX NOISE.^2; % КВАДРАТ МАКСИМУМА
АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА ШУМА
disp('%')
disp('%')
disp(['e1 low = 'num2str(e1 low) 'e1 up = 'num2str(e1 up)])
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для вывода граничных значений порога для ВТОРОГО КРИТЕРИЯ
нажмите
<ENTER>')
pause
e2 low= MAX NOISE2/P; % НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ПОРОГА ДЛЯ ВТОРОГО
КРИТЕРИЯ
e2 up= MAXS2/P; <u>% ВЕР</u>ХНЯЯ ГРАНИЦА ПОРОГА ДЛЯ ВТОРОГО
КРИТЕРИЯ
disp('%')
disp('%')
disp(['e2 low = 'num2str(e2 low) 'e2 up = 'num2str(e2 up)])
disp('%')
```

```
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПО ПЕРВОМУ
```

КРИТЕРИЮ')

disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКА аддитивной смеси сигнала с шумом нажмите <ENTER>') pause figure('Name', 'Mixture of Signal and Noise', 'NumberTitle', 'off') stem(n,s,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('n'), ylabel('s(n)') title(strcat(['Mixture of Signal and Noise N = (num2str(N))) disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ амплитудного и НОРМИРОВАННОГО амплитудного спектров') disp('% аддитивной смеси сигнала с шумом нажмите <ENTER>') pause figure('Name', 'Amplitude Spectrum and Normalized Amplitude **Spectrum**', 'NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MODS,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('|S(k)|') title(strcat(['Amplitude Spectrum N = ',num2str(N)])) subplot(2,1,2), stem(k, MODS/MAXS,'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('k'), ylabel('|S(k)|/max|S(k)|') title(streat(['Normalized Amplitude Spectrum N = (.num2str(N))) disp('%') disp('%') disp('% Введите выбранное значение порога e1 для ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ') disp('%') e1 = input('e1 = '); % ВЫБРАННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОРОГА ДЛЯ ПЕРВОГО КРИТЕРИЯ disp('%') disp('% Для вывода ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ fft e1 нажмите <ENTER>') pause [MODm,m] = fft e1(MODS,e1) % ВНЕШНЯЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ ГАРМОНИК ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПО ПЕРВОМУ КРИТЕРИЮ disp('%') disp('%') disp('% СРАВНИТЕ значения ВЫДЕЛЕННЫХ ПО ПЕРВОМУ КРИТЕРИЮ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ') disp('% с исходными данными')

disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')

disp('% п.6. ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПО ВТОРОМУ КРИТЕРИЮ')

disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ амплитудного спектра и КВАДРАТА амплитудного') disp('% спектра, НОРМИРОВАННОГО к величине средней мощности') disp('% аддитивной смеси сигнала с шумом, нажмите <ENTER>') pause figure('Name', 'Amplitude Spectrum and Normalized Amplitude Spectrum Squire','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MODS,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('|S(k)|') title(strcat(['Amplitude Spectrum N = ',num2str(N)])) subplot(2,1,2), stem(k,(MODS.^2)/P,'MarkerSize',3,'Linewidth',2) grid, xlabel('k'), ylabel(' $|S(k)|^2/P'$) title(strcat(['Normalized Amplitude Spectrum Squire N = ',num2str(N)])) disp('%') disp('%') disp('% Введите выбранное значение порога е2 для ВТОРОГО КРИТЕРИЯ') disp('%')e2 = input('e2 = '); % ВЫБРАННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОРОГА ДЛЯ ВТОРОГО КРИТЕРИЯ disp('%') disp('% Для вывода ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ fft e2 нажмите <ENTER>') pause [MODm,m] = fft e2(MODS,e2)% ВНЕШНЯЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯАМПЛИТУД И ЧАСТОТ ГАРМОНИК ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПО ВТОРОМУ КРИТЕРИЮ disp('%') disp('%')

disp('% СРАВНИТЕ значения ВЫДЕЛЕННЫХ ПО ВТОРОМУ КРИТЕРИЮ АМПЛИТУД И ЧАСТОТ') disp('% с исходными данными') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ и МОДУЛЯ ее ДПФ,') disp('% ВОССТАНОВЛЕННОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА и его СПЕКТРА') disp('% и ИСХОДНОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА нажмите <ENTER>') pause Xa = [X(N/2+1:N), X(1:N/2)]; % СПЕКТР АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА (С ТОЧНОСТЬЮ ДО ПОСТОЯННОГО МНОЖИТЕЛЯ) **і** = 1; % СЧЕТЧИК ЗНАЧЕНИЙ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА fort= 0:0.25*T:(N-1)*T % ЗНАЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ВРЕМЕНИ s = 0: fork= -N/2:N/2-1 % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА s = s + Xa(k+N/2+1)*exp(j*2*pi*k*t/(N*T)); % ВОССТАНОВЛЕНИЕАНАЛОГОВОГО СИГНАЛА end xa(i) = (1/N).*s; % ЗНАЧЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА i = i+1;end $\mathbf{t} = 0:0.25 * T:(N-1) * T;$ xt = A1*cos(2*pi*f1*t+pi/4)+A2*cos(2*pi*f2*t+pi/8); % ЗНАЧЕНИЯИСХОДНОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА k= 0:N-1; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА **MODa**= (2/N)*abs(Xa); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР ВОССТАНОВЛЕННОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА **MODa(1)** = (1/N)*abs(Xa(1)); figure('Name','Original Periodic Sequence & FFT, Reconstructed Analog Signal

&

Spectrum, Original Analog Signal', 'NumberTitle', 'off') subplot(3,2,1), stem(n,x,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), ylabel('x(n)') title(streat(['Original Periodic Sequence N = ',num2str(N)])) subplot(3,2,2), stem(k,abs(X),'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('|X(k)|') title(streat(['DFT of Original Periodic Sequence N = ',num2str(N)])) subplot(3,2,3), plot(t,real(xa)), grid, xlabel('t') ylabel('x(t)'),title('Reconstructed Analog Signal') k = -N/2:N/2-1;subplot(3,2,4), stem(k,MODa,'MarkerSize',3,'Linewidth',2), grid xlabel('k'), ylabel('|Xa(k)|') title('Amplitude Spectrum of Reconstructed Analog Signal') subplot(3,2,5), plot(t,xt), grid, xlabel('t') ylabel('x(t)'), title('Original Analog Signal') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.8. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ДПФ и СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ конечной') disp('% последовательности, вычисленной ДВУМЯ способами, нажмите <ENTER>') pause L = 2*N; % КОЛИЧЕСТВО ОТСЧЕТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ НА ПЕРИОДЕ l = 0: forl = 0:(L-1) % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА S = 0: forn= 0:(N-1) % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ S = S + x(n+1)*exp(-j*2*pi*l*n/L); % ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ end **ХW**(1+1) = S; <u>% ЗНАЧЕНИЯ В</u>ОССТАНОВЛЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

l = l+1;

end

```
xz = [xzeros(1,(L-N))]; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ДОПОЛНЕННАЯ
НУЛЯМИ ДО ДЛИНЫ
L
XZ = fft(xz); % ДПФ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ДОПОЛНЕННОЙ НУЛЯМИ
k = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
w = 0:2*pi/L:2*pi-2*pi/L; % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
I = 0:(L-1); % ДИСКРЕТНАЯНОРМИРОВАННАЯЧАСТОТА
figure('Name','DFTandSpectralDensity','NumberTitle', 'off')
subplot(3,1,1), stem(k,abs(X),'MarkerSize',3,'Linewidth',2)
grid, xlabel('k'), ylabel('|X(k)')
title(streat(['DFT Modulus N = ',num2str(N)]))
subplot(3,1,2), plot(w,abs(XW),'MarkerSize',3,'Linewidth',2)
grid, xlabel('w'), ylabel('|X(w)|')
title(streat(['Spectral Density Modulus (option 1) L = ',num2str(L)]))
subplot(3,1,3), plot(w,abs(XZ),'MarkerSize',3,'Linewidth',2)
grid, xlabel('w'), ylabel('|X(w)|')
title(streat(['Spectral Density Modulus (option 2) L = ',num2str(L)]))
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.9. УМЕНЬШЕНИЕ ПЕРИОДА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО
ЧАСТОТЕ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ДПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ КОНЕЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ,')
disp('% ДПФ и СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Finite Sequences, DFT and Spectral Densities','NumberTitle',
'off')
L = [N 2*N 4*N];
for \mathbf{i} = 1:length(L)
xz = [xzeros(1,(L(i)-N))]; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ДОПОЛНЕННАЯ
НУЛЯМИ ДО
ДЛИНЫL(i)
\mathbf{XZ} = \mathrm{fft}(\mathrm{xz});
Delta f(i) = Fs/L(i);
n = 0:length(xz)-1; % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
k= 0:length(XZ)-1; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
```

```
subplot(3,2,2*i-1), stem(n,xz,'MarkerSize',3), xlabel('n'), grid
title(strcat(['Finite Sequence x(n) L = ',num2str(L(i))]))
subplot(3,2,2*i), plot(k,abs(XZ), 'r','MarkerSize',3, 'Linewidth',2), grid,
hold on, stem(k,abs(XZ),':'), xlabel('k')
title(strcat(['DFT and Spectral Density Modulus L = ',num2str(L(i))]))
end
disp('%')
```

```
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ПЕРИОДОВ ДПФ и ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО
ЧАСТОТЕ нажмите
<ENTER>')
pause
disp('%')
disp([' L = [',num2str(L) ']'])
disp('%')
disp('%')
disp('%')
```

disp('% РАБОТА ЗАВЕРШЕНА')

9.4.1. Используемые внешние функции

В script-файле lr_09 используются две внешние функции.

Внешняя функция fft_e1, предназначенная для определения значений модуля ДПФ (MODm) и дискретных нормированных частот (m) гармоник, которые согласно первому критерию (9.7) при заданном пороге ɛ1 (9.10) (e1) относят к полез-

номусигналу:

function [MODm,m] = fft_e1(MODX,e1)

```
% Определение значений модуля ДПФ и частот полезного сигнала
%
% MODX — вектор значений модуля ДПФ смеси сигнала с шумом
% е1 — заданный порог
%
% MODm — вектор значений модуля ДПФ полезного сигнала
% т — вектор значений частот полезного сигнала
%
i = 1;
MAX = max(MODX);
for k = 1:length(MODX)
if (MODX(k)/MAX)>e1
MODm(i) = MODX(k);
m(i) = k-1;
i = i+1;
end
```

end

Внешняя функция fft_e2, предназначенная для определения значений модуля ДПФ (MODm) и дискретных нормированных частот (m) гармоник, которые согласно второму критерию (9.8) при заданном пороге є2 (9.11) (e2) относят к полезномусигналу:

function [MODm,m] = fft_e2(MODX,e2)

% Определение значений модуля ДПФ и частот полезного сигнала %

```
\%~{\rm MODX} — вектор значений модуля ДПФ смеси сигнала с шумом
```

```
% е2 — заданный порог
```

%

% MODm — вектор значений модуля ДПФ полезного сигнала

% т — вектор значений частот полезного сигнала

%

```
i = 1;
```

 $P = sum(MODX.^2)/length(MODX); % P — средняя мощность смеси сигнала с шумом$

```
for k = 1:length(MODX)
if ((MODX(k).^2)/P)>e2
MODm(i) = MODX(k);
m(i) = k-1;
i = i+1;
end
end
```

9.5. Задание на самостоятельную работу

Заданиена самостоятельную работу заключается в создании function-файлов для вычисления ДПФ последовательностей с использованием исходных данных из табл. 9.1 для своего номера бригады N_{бр}.

Последовательности выбираются из представленного далее списка: 1С. Периодическая последовательность с периодом N/2 :

 $x(n) = A_1 \cos(\hat{\omega}_1 n + \pi/4) + A_2 \cos(\hat{\omega}_2 n + \pi/16)$ (9.26)

Вывести графики амплитудного и фазового спектра периодической последовательности.

Определить амплитуды и частоты дискретных гармоник, используя functionфайл fft_e1.

2С. Конечная последовательность x(n) (9.26) длины N/2.

Вывести графики модуля и аргумента ДПФ конечной последовательности.

3С. Конечная последовательность длины N:

$$x_1(n) = \frac{x_2(n), n = 0, \dots, N \ 2 - 1;}{x_3(n), n = N \ 2, \dots, N - 1}$$
9.27)

где

$$\begin{aligned} x_2(n) &= A_1 \cos(\widehat{\omega}_1 n), n = 0, \dots, N/2 - 1; \\ x_3(n) &= A_2 \cos(\widehat{\omega}_2 n), n = 0, \dots, N/2 - 1; \end{aligned}$$

Вывести графики конечных последовательностей x(n) (9.23) и $x_1(n)$ (9.27) и модулей их ДПФ.

4С. Цифровой единичный импульс (7.10) на интервале n∈[0; N-1].

Вывести графики цифрового единичного импульса и модуля его ДПФ.

5С. Последовательность с однотональной амплитудной модуляцией (7.23):

$$x(n) = C[1 + m\cos(\Omega n + \varphi_{\Omega})]\cos(\widehat{\omega}_0 n + \varphi_0).$$

Задать значения C=1, $\hat{\omega}_0 = 2\pi/4, \phi_0=0, \Omega = \hat{\omega}_0/4, \phi_{\Omega}=0, m=0,5$ и период последовательности 2N.

Вывести графики последовательности и ее амплитудного спектра.

6С. Последовательность x(t)(7.25):

$$x(t)|_{t=nT} = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$$

Задать частоту дискретизации f_д=2000.

Вывести графики последовательности на интервале t =nT ∈[-500(N-1); 500(N-1)T] с шагом T и модуля ее ДПФ.

7С. Гауссов радиоимпульс (7.24):

$$x(n) = e^{-an^2} \cos(\widehat{\omega}_1 n)$$

Задать а= 0,0005 и $\omega_1 = \pi/12$.

Вывести графики последовательности на интервале п∈[-3(N-1);3(N-1)] и модуля ее ДПФ.

9.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения каждого пункта задания, включая копируемые из окна Command Window результаты вычислений (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Запишите формулы ДПФ.
- 2. Что такое поворачивающий множитель?
- 3. Чему равно разрешение по частоте при вычислении ДПФ?
- 4. С чем связаны трудности прямого вычисления ДПФ по формуле (9.1)?
 - 5. Что такое БПФ?
 - 6. Каков порядок сложности алгоритмов ДПФ и БПФ Кули—Тьюки?
 - 7. Назовите основные свойства ДПФ.
 - 8. Дайте определение дискретной нормированной частоты.
 - 9. Поясните смысл ДПФ для периодической последовательности.

10. Как с помощью ДПФ рассчитывается амплитудный и фазовый спектры периодической последовательности?

11. Поясните смысл ДПФ для конечной последовательности.

12. Как связаны значения абсолютных частот (в герцах [Гц] и радианах в секунду [рад/с]) и дискретных нормированных частот?

13. Поясните смысл приведенных критериев для выделения полезного сигнала из его аддитивной смеси с шумом.

14. Как задаются значения порогов в первом и втором критериях выделения полезного сигнала?

15. Как восстановить аналоговый периодический сигнал с финитным спектром по отсчетам ДПФ и на основе ряда Котельникова?

16. Как вычислить спектральную плотность в L точках на основе ДПФ при L > N?

17. Как определить разрешение по частоте в ДПФ при добавлении нулей к исходной последовательности?

Дискретное преобразование Фурье (часть 2)

Цель работы: изучить применение ДПФ в условиях растекания спектра, для улучшения различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами, быстрого вычисления линейных, круговых и секционированных сверток и овладеть соответствующими программными средствами MATLAB. 10.1. Краткая теоретическая справка

В этой главе мы продолжим знакомство с применением ДПФ для решения типовых задач ЦОС.

10.1.1. Растекание спектра

Растеканием спектра называют появление дополнительных составляющих в спектральном составе последовательности при вычислении ДПФ.

Ранее было определено условие (9.5), при котором гарантируется точное выделение гармоник последовательности x n() с частотами f_i .

Эффект растекания спектра наблюдается в том случае, если хотя бы для одной из дискретных гармоник, входящих в спектральный состав последовательности, с частотой f_i на интервале NT укладывается нецелое число периодов T_i и отношение (9.5):

$$P_i = \frac{NT}{T_i} = \frac{Nf_i}{f_{\mathcal{A}}} \tag{10.1}$$

оказывается не целым числом, а частота гармоники f_i — не кратной периоду дискретизации по частоте $\Delta f = f_A / N$ (сравните с (9.5)):

$$f_i = P_i \Delta f$$

Вследствие этого в периодическом продолжении гармоники с частотой f_i появятся разрывы (скачки) на границах периода последовательности, из-за которых спектр расширяется.

уменьшения эффекта Для растекания спектра (полностью OH неустраним) применяют весовые функции принципиально (окна) вещественные неотрицательные последовательности, максимальные в центре и монотонно спадающие к границам, что ослабляет влияние разрывов при периодическом продолжении последовательности. Для стандартных окон вычисляются автоматически по известным MATLAB значения wn() аналитическим формулам.

Выбор окна — не формализуемая задача, решаемая, как правило, простым перебором окон и/или изменением их параметров.

10.1.2. Улучшение различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами

При вычислении ДПФ конечной последовательности длины N разрешение по частоте равно периоду дискретизации по частоте $\Delta f = f_{\pi} / N$ (см. разд. 9.1.3).
Для улучшения различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами f₁ и f₂, расстояние между которыми удовлетворяет условию:

$$\Delta f < |f_1 - f_2| < 2\Delta f$$
 (Исхо
10.2) Дную

последова

тельность надо дополнить нулями до длины L:

$$L \ge \frac{f_{\rm A}}{|f_1 - f_2| - \Delta f}$$
 10.3)

Затем по L точкам восстановить спектральную плотность с периодом дискретизации по частоте $\tilde{\Delta} = f_{\rm d}/L$ и по графику модуля спектральной плотности определить ближайшие пики с максимальными амплитудами на частотах, близких к f_1 и f_2 . В общем случае эти частоты могут быть некратными периоду $\tilde{\Delta}f$, а следовательно, они будут определяться с погрешностью.

Для вычисления ДПФ с автоматическим добавлением нулей к последовательности предусмотрен специальный формат функции fft:

X = fft(x,L)

где х — N-точечная последовательность; L — длина последовательности, автоматически дополненной нулями; Х — L-точечное ДПФ.

10.1.3. Вычисление линейных и круговых сверток с помощью ДПФ

Ранее (см. разд. 8.1.1) была рассмотрена функция сопу для вычисления реакции по формуле свертки

$$y(n)\sum_{m=0}^{L-1}h(n-m)x(m) = \sum_{m=0}^{L-1}h(m)x(n-m)$$
10.4)

где L=N₁+N₂-1 — длина линейной (апериодической) свертки, а N₁ и N₂ — длины импульсной характеристики h(n) и воздействия x(n).

Для сокращения объема вычислений линейная свертка (10.4) рассчитывается на основе круговой свертки с помощью ДПФ и ОДПФ с использованием алгоритмов БПФ и ОБПФ.

В общем случае круговая свертка периодических последовательностей $x_1(n)$ и $x_2(n)$ с одинаковым периодом N определяется как

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x_1(m) x_2[(n-m) \mod N]$$

=
$$\sum_{m=0}^{N-1} x_1[(n-m) \mod N] x_2(m)$$
 (10.5)

где записи (n-m)mod N соответствует значение (n-m) по модулю N.

Часть II. Моделирование цифровой обработки сигналов в MATLAB

Для вычисления круговой свертки (10.5) рассчитывается N-точечное ДПФ, равное произведению N-точечных ДПФ сворачиваемых последовательностей:

$$X(k) = X_1(k)X_2(k), \qquad k = 0, 1, ..., N - 1$$
 10.6)

а затем с помощью ОДП Φ — последовательность x(n) .

В (10.4) для перехода от линейной свертки к круговой с периодом L последовательности h(n) и x(n) дополняют нулями до длины L:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{L-1} \tilde{h}[(n-m)modL]\tilde{x}(m) = \sum_{m=0}^{L-1} \tilde{h}(m)\tilde{x}[(n-m)modL]$$
(10.7)

где $\tilde{h}(n)$ и $\tilde{x}(n)$ — дополненные нулями последовательности h(n) и x(n). Рассчитывается L-точечное ДПФ круговой свертки (10.7):

$$Y(k) = H(k)X(k), k = 0, 1, ..., L - 1$$
10.8)

а затем с помощью ОДПФ — реакция у(n).

В MATLAB для вычисления линейной свертки на основе круговой свертки с использованием алгоритмов БПФ и ОБПФ предусмотрена функция: y = fftfilt(h,x)

где h — импульсная характеристика длины N₁; х и у — векторы отсчетов воздействия и реакции одинаковой длины N₂.

Отметим, что длина реакции равна длине второго аргумента N₂ (воздействия), в то время как при использовании функции conv для вычисления реакции (10.4) ее длина будет равна длине линейной свертки L (см. разд. 8.1.1).

10.1.4. Вычисление секционированных сверток с помощью ДПФ

Вычисление линейных сверток при большой длине воздействия N_2 производится методом перекрытия с накоплением с представлением последовательности x(n) в виде коротких смежных секций длиной L, сравнимой с длиной импульсной характеристики N_1 . Линейная свертка формируется на основе коротких секционированных сверток, вычисляемых с помощью ДПФ и ОДПФ.

Для этого в MATLAB предусмотрен следующий формат функции fftfilt с использованием алгоритмов БПФ и ОБПФ:

y = fftfilt(h,x,L)

где h — вектор отсчетов импульсной характеристики длины N_1 ; x — вектор отсчетов воздействия длины $N_2(N_2 \gg N_1)L$ — длина L смежных секций; у — вектор отсчетов реакции длины N_2 .

10.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с проверкой равенства Парсеваля, исследованием эффекта растекания спектра, улучшением различения близко

расположенных гармоник и вычислением круговых, линейных и секционированных сверток с по- мощью ДПФ с использованием программных средств MATLAB.

10.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файла lr_10 и functionфайла input_1, которые хранятся на прилагаемом компакт-диске в папке LAB_DSP\LAB_10.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_10 по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 10.1 для номера бригады

 $N_{\text{бр}},$ где $N_{\text{бр}}$ =1, 2, ..., 30. Функция $N_{\text{бр}}$ mod M в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{\text{бр}}$ по модулю M .

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables_10 хранятся табл. 10.1 исходных данных и пример ее заполнения для N_{бр}=1.

Задание на лабораторную работу связано с вычислением ДПФ и включает в себя следующие пункты:

1. Проверка равенства Парсеваля:

$$\sum_{k=0}^{N-1} x^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2.$$
 (0.9)

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
N бр	Номер бригады	N _{6p}	Nb =
Ν	Длина (период) последовательности	N=64	N = 64
$f_{\scriptscriptstyle m A}$	Частота дискретизации	$f_{\pi} = 2000(N_{6p} \mod 5 + 1)$	Fs =
A ₁	Амплитуды	$A_1 = 1 + 0.01 N_{\delta p}$	A1 =
A 2	дискретных гармоник	$A_2 = 2A_1$	A2 =
f_1	Частоты	$f_1 = f_{\pi}/4$	f1 =
f_2	дискретных гармоник	$f_2 = 1,5f_1$	f2 =
М	Период последовательности	M = 71	M = 71

Таблица 10.1. Таблица исходных данных

f_{11}	Частоты	$f_{11} = 1, 1f_1$	f1_1 =
f_{21}	дискретных гармоник	$f_{21} = 1,07 f_2$	f2_1 =
f ₁₂ f ₂₂	Частоты дискретных гармоник	$f_{12} = 1,05 f_1$ $f_{22} = f_{12} + 1,1 \Delta f_1,$ где $\Delta f = \frac{f_{\pi}}{N}$	$f1_2 =$ $f2_2 =$ $f1_2+1.1*Fs/N$
x ₃ (n)	Периодическая последовательность (период)	$x_3(n) = N_{6p}[0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5]$	Вектор х3 = []
x ₄ (n)	Периодическая последовательность (период)	$x_4(n) = N_{\delta p}[0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1]$	Вектор х4 = []
x ₅ (n)	Конечная последовательность	$x_5 (n) = N_{6p}[0,1; 0,2; 0,3]$	Вектор х5 = []
x ₆ (n)	Конечная последовательность	$x_6 (n) = N_{\delta p}[0,3; 0,2; 0,1; 0,2; 0,3]$	Вектор х6 = []
b_0 b_1 b_2	Коэффициенты числителя передаточной функции	$b_{0} = 0.5 + 0.02N_{6p}$ b_{1} $= b_{0}(-1)^{N_{6p}+1}(0.9822 + 0.0178N_{6p})$ b_{2} $= b_{0}[0.8 + 0.2(N_{6p}mod 5)]$	Вектор b = []

Таблица 10.1 (окончание)

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
ao	Коэффициенты знаменателя передаточной	$a_0 = 1$ a_1 $= (-1)^{N_{6p}} (0,7778)$	Вектор а = []
a ₁	функции	$+ 0,025 N_{\rm 6p})$	
a ₂		a_2 = 0,64 + 0,006 N_{6p}	
N1	Длина ИХ	$N_1 = N_{\delta p} \mod 10 +$	N1 =

		20	
N_2	Длина воздействия	$N_2 = N_{6p} \mod 10 + 30$	N2 =
N ₃	Длина воздействия	N ₃ =N _{6p} mod10 + 200	N3 =

Проверить для периодической последовательности (идентификатор x) с периодом N :

$$x(n) = A_1 \cos(2\pi f_1 nT) + A_2 \cos(2\pi f_2 nT)$$
(0)

используя ее тождественное представление в виде:

$$x(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_{\mathcal{A}}}n\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_{\mathcal{A}}}n\right) = A_1 \cos(\widehat{\omega}_1 n) \qquad (10.11)$$
$$+ A_2 \cos(\widehat{\omega}_2 n)$$

Левая часть равенства (10.9) — идентификатор E1, правая — E2.

Пояснить смысл равенства Парсеваля.

2. Исследование эффекта растекания спектра для одной дискретной гармоники.

Выполнить для последовательности

$$\tilde{x}(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1 n}{f_{\text{A}}}\right) = A_1 \cos(\widehat{\omega}_1 n) \tag{10.12}$$

с двумя значениями периода:

N — идентификатор последовательности x_N;

• М — идентификатор последовательности х_М. Вывести:

• соответствующие значения Р (10.1) для частоты дискретной гармоники *f*₁ — идентификаторы Р_N и Р_М.

Во втором случае в отношение (10.1) следует подставить N = M;

• графики амплитудных спектров (идентификаторы MOD_N и MOD_M) в шкале дискретных нормированных частот.

Пояснить:

с какой целью определяется значение P;

• в каком случае и почему наблюдается растекание спектра.

3. Исследование возможности уменьшения растекания спектра с помощью окна.

Применить окно Хэмминга (идентификатор win_M) для последовательности х n() (10.12) в условиях растекания спектра.

Вывести графики амплитудных спектров до и после применения окна (идентификаторы MOD_M и MODW_M) в шкале дискретных нормированных частот.

Пояснить, что изменилось в результате применения окна.

4. Исследование эффекта растекания спектра для суммы двух дискретных гармоник.

Для периодической последовательности x(n) (10.11) с периодом N задать значения частот:

$$f_1 = f_{11};$$

 $f_2 = f_{21};$

и для новой последовательности (идентификатор х1) вывести:

• значения Р (10.1) для частот дискретных гармоник f_{11} и f_{21} — идентификаторы Р1_1 и Р2_1;

• применить окно Хэмминга (идентификатор win_N) в условиях растекания спектра;

• вывести графики амплитудных спектров до и после применения окна (идентификаторы MOD1 и MODW1) в шкале дискретных нормированных частот.

Пояснить причину растекания спектра и цель применения окна.

5. Улучшение различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами.

Для конечной последовательности x(n) (10.11) длины N задать значения частот:

$$f_1 = f_{12};$$

 $f_2 = f_{22};$

f2 = f22, и для новой последовательности (идентификатор x2)вывести:

• разрешение по частоте $\Delta f = f_{\pi}/N$ (идентификатор Delta_N);

- расстояние между частотами $f_{12} f_{22}$ (идентификатор Delta_f);
- требуемую длину *L* (10.3) (идентификатор*L*);
- период дискретизации по частоте $\Delta \tilde{f} = \frac{f_{\rm A}}{L}$ (идентификатор

Delta_L);

• график модуля спектральной плотности, восстановленной по L отсчетам ДПФ, с помощью функции plot, и одновременно — L-точечное ДПФ (идентификатор MOD2_L) пунктиром с помощью функции stem;

• частоты ближайших пиков в шкалах дискретных нормированных частот (идентификаторы k_1 и k_2) и абсолютных частот (идентификаторы f_1 и f_2) в основной полосе частот $k \in [0; int(L/2)-1]$.

Частоты первого пика определяются с помощью функции тах.

Для определения частоты второго пика следует найти пики справа и слева от первого пика на периоде дискретизации $\Delta f = f_{\rm d}/N$ с помощью функции max и выбрать наибольший из них.

Справа и слева от первого пика на интервале $\Delta f = f_{\rm d}/N$ расположено

 $K = int(\Delta f / \Delta \tilde{f}) = int(L/N)$ отсчетов (идентификатор K).

По графику спектральной плотности, используя кнопку **Zoom in** на панели инструментов, определить частоты ближайших пиков и сравнить их с выведенными значениями.

Пояснить:

• соответствуют ли близко расположенные частоты условию (10.2);

• соответствует ли выведенная длина L условию (10.3);

• с какой погрешностью определены частоты и причину погрешности.

6. Вычисление круговой свертки.

Вычислить круговую свертку у34(n) (идентификатор у34) периодических последовательностей $x_3(n)$ и $x_4(n)$ с помощью функций fft и ifft и вывести графики трех периодов последовательностей и свертки, используя функцию repmat.

Записать формулу круговой свертки и пояснить алгоритм ее вычисления с помощью ДПФ.

7. Вычисление линейной свертки.

Вычислить линейную свертку $y_{56}(n)$ конечных последовательностей $x_5(n)$ и $x_6(n)$ двумя способами:

с помощью функции conv (идентификатор у56_1);

с помощью функции fftfilt (идентификатор у56_2).

Вывести графики последовательностей $x_5(n)$, $x_6(n)$ и свертки $y_{56}(n)$, вычисленной двумя способами, в одинаковом диапазоне по оси абсцисс с помощью функции xlim([0 MAX-1]), где MAX — максимальная длина свертки.

Записать формулу линейной свертки и пояснить алгоритм ее вычисления с помощью ДПФ.

8. Вычисление реакции ЛДС по формуле свертки.

В качестве воздействия x₇(n) (идентификатор x7) выбрать дискретный прямоугольный импульс длины N₂:

$$x_7(n) = \begin{cases} 1, 0 \le n \le int(N_2/2); \\ 0, int(N_2/2) \le n \le (N_2 - 1). \end{cases}$$
(10.13)

Для моделирования воздействия (10.13) использовать function-файл input_1

(см. разд. 10.4.1).

Для вычисления импульсной характеристики (ИХ) h(n) длины N_1 с помощью функции impz использовать коэффициенты передаточной функции рекурсивного звена 2-го порядка b_i и a_k .

Вычислить реакцию у₇(n) по формуле свертки (10.4) двумя способами:

с помощью функции conv (идентификатор у7_1);

• с помощью функции fftfilt (идентификатор у7 2).

Вывести графики ИХ, воздействия и реакции, вычисленной двумя способами, в одинаковом диапазоне по оси абсцисс с помощью функции xlim([0 L-1]), где L — длина свертки, вычисленной с помощью функции conv.

Записать формулу свертки.

Пояснить:

 преимущество вычисления реакции по формуле свертки с помощью ДПФ;

• чему равна длина реакции, вычисленной первым и вторым способами;

• в каком случае длину реакции необходимо ограничить до длины воздействия.

9. Вычисление реакции ЛДС методом перекрытия с накоплением.

В качестве воздействия $x_8(n)$ (идентификатор x8) выбрать прямоугольный импульс $x_7(n)$ (10.15) длины N_3 .

Вычислить реакцию у₈(n) по формуле свертки двумя способами:

с помощью функции fftfilt без перекрытия (идентификатор у8_1);

• с помощью функции fftfilt методом перекрытия с накоплением (идентификатор у8_2), задавая длину секции равной длине ИХ N₁.

Вывести графики ИХ, воздействия и реакций в одинаковом диапазоне по оси абсцисс с помощью функции xlim([0 N3-1]), где N3 — длина воздействия и реакции.

Пояснить, в каком случае целесообразно вычислять реакцию методом перекрытия с накоплением.

10.4. Типовой script-файл

для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должна быть представлена табл. 10.1 исходных данных

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к scriptфайлуlr_10 по

его имени:

>> lr_10

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбинацию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками не закрывать.

Листинг script-файла lr_10 имеет вид:

>> type lr_10 script clc

clear

disp('% ЛР №10. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ (часть 2)') disp('%')

disp('%')

disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')

```
DATA=0;
while DATA==0
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
N = input('N = '); <u>% ДЛИНА (ПЕРИОД) ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ</u>
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ(Гц)
A1 = input(A1 = ); % АМПЛИТУДЫ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК
A2 = input('A2 = ');
f1 = input('f1 = '); % ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (Гц)
f2 = input('f2 = ');
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('\%')
disp('%')
disp('% п.1. ПРОВЕРКА РАВЕНСТВА ПАРСЕВАЛЯ')
n = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
k = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИР<u>ОВАННАЯ ЧАСТОТА</u>
w1 = 2*pi*f1/Fs; w2 = 2*pi*f2/Fs; % НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (РАД)
\mathbf{x} = A1^*\cos(w1^*n) + A2^*\cos(w2^*n); \% ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ(ПЕРИОД N)
\mathbf{X} = \text{fft}(\mathbf{x}); \% ДПФ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
E1 = sum(x.^2); % ЭНЕРГИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ВЫЧИСЛЕННАЯ
ПО ЕЕ ОТСЧЕТАМ
E2 = (1/N)*sum(abs(X).^2); % ЭНЕРГИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ,
ВЫЧИСЛЕННАЯ ПО
ОТСЧЕТАМ ДПФ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода левой (E1) и правой (E2) частей РАВЕНСТВА
ПАРСЕВАЛЯ нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp(['E1 = ',num2str(E1),'E2 = 'num2str(E2)])
disp('%')
disp('%')
```

```
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('\%')
disp('%')
disp('% п.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА ДЛЯ
ОДНОЙ ДИСКРЕТНОЙ
ГАРМОНИКИ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
DATA=0;
while DATA==0
M = input('M = '); \% ПЕРИОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИМ
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
n = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ (ПЕРИОД N)
\mathbf{k} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (ПЕРИОД N)
w1 = 2*pi*f1/Fs; % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (РАД)
\mathbf{x} N = A1*cos(w1*n); % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ (ПЕРИОД N)
X N = fft(x N); % ДПФ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПЕРИОД N)
MOD N = (2/N)*abs(X N); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПЕРИОД N)
MOD N(1) = (1/N)*abs(X N(1));
n1 = 0:(M-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ (ПЕРИОД М)
k1 = 0:(M-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (ПЕРИОД М)
\mathbf{X} M = A1*cos(w1*n1); % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ (ПЕРИОД M)
X M = fft(x M); % ДПФ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПЕРИОД M)
MOD M = (2/M)*abs(X M); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПЕРИОД М)
MOD M(1) = (1/M)*abs(X M(1));
Р N = N*f1/Fs; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ N
Р_М = M*f1/Fs; <u>% ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ</u> ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ М
disp('%')
disp('%')
```

disp('% Для вывода ЧИСЛА ПЕРИОДОВ дискретной гармоники С ЧАСТОТОЙ f1 нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['N = ',num2str(N),' --> P N = 'num2str(P N)])disp(['M = ',num2str(M),' --> P M = 'num2str(P M)])disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Amplitude Spectrum','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MOD N,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k') title(streat(['Amplitude Spectrum of the Periodic Sequence N = (num2str(N))) subplot(2,1,2), stem(k1,MOD M,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k') title(strcat(['Amplitude Spectrum of the Periodic Sequence M = (.num2str(M))) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% ИССЛЕДОВАНИЕ возможности п.З. УМЕНЬШЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮОКНА') win M = hamming(M)'; % ОКНО ХЭММИНГА — ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ДЛИНЫ Μ **хw** M = x M.*win M; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ВЗВЕШЕННАЯ ОКНОМ **XW** M = fft(xw M); % ДПФ ВЗВЕШЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИMODW M =(2/M)*abs(XW M);% АМПЛИТУЛНЫЙ СПЕКТР ВЗВЕШЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ MODW M(1) = (1/M)*abs(XW M(1));disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ ДО и ПОСЛЕ применения ОКНА нажмите<ENTER>') pause figure('Name', 'Reducing Spectrum Leakage with the help of Window **Functions'**, 'NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k1,MOD_M,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k') title(streat(['Amplitude spectrum without windowing M = ',num2str(M)]))

```
subplot(2,1,2), stem(k1,MODW M,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k')
title(streat(['Amplitude spectrum with Hamming Window M = ',num2str(M)]))
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА ДЛЯ
СУММЫ ДВУХ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
DATA=0;
while DATA==0
f1 1 = input('f1 1 = '); % ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (Гц)
f2 1 = input('f2 \ 1 = ');
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
\mathbf{n} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
\mathbf{k} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
w1 1 = 2*pi*f1 1/Fs; w2 1 = 2*pi*f2 1/Fs; % НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (РАД)
x1 = A1*cos(w1 1*n)+A2*cos(w2 1*n); % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
(ПЕРИОД N)
X1 = fft(x1); % ДПФ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ПЕРИОД N)
MOD1 = (2/N)*abs(X1); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
MOD1(1) = (1/N)*abs(X1(1));
P1 1 = N*f1 1/Fs; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f1 1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ N
Р2 1 = N*f2 1/Fs; <u>% ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ</u> ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f2 1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ N
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ЧИСЛА ПЕРИОДОВ дискретных гармоник С
ЧАСТОТАМИ f1 1 и f2 1 нажмите<ENTER>')
```

```
pause
disp('%')
disp('%')
disp([' f1 1 = ',num2str(f1 1),' --> P1 1 = 'num2str(P1 1)])
disp([' f2 1 = ',num2str(f2 1),' --> P2 1 = 'num2str(P2 1)])
win N = hamming(N)'; % OKHOXЭММИНГА — BEKTOP-CTOЛБЕЦДЛИНЫ
Ν
xw1 = x1.*win N; \% ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ВЗВЕШЕННАЯ ОКНОМ
(ПЕРИОДN)
XW1 = fft(xw1); \% ДПФ ВЗВЕШЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
(ПЕРИОД N)
MODW1 =(2/N)*abs(XW1); <u>% АМПЛИТУД</u>НЫЙ СПЕКТР
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
MODW1(1) =(1/M)*abs(XW1(1));
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ ДО и ПОСЛЕ
применения ОКНА нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Reducing Spectrum Leakage with the help of Window
Functions', 'NumberTitle', 'off')
subplot(2,1,1), stem(k,MOD1,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k')
title(strcat(['Amplitude spectrum without windowing N = ',num2str(N)]))
subplot(2,1,2), stem(k,MODW1,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k')
title(strcat(['Amplitude spectrum with Hamming Window N = (,num2str(N))))
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. УЛУЧШЕНИЕ РАЗЛИЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК С
БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫМИ
ЧАСТОТАМИ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
DATA=0;
while DATA==0
f1 2 = input('f1 2 = '); % ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (Гц)
f2 2 = input('f2 2 = ');
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
```

```
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ПЕРИОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ и')
disp('% ЧАСТОТ ГАРМОНИК нажмите <ENTER>')
disp('%')
disp('%')
disp([' N = ',num2str(N)])
disp([' f1 2 = ',num2str(f1 2),' f2 2 = 'num2str(f2 2)])
Delta N= Fs/N; % РАЗРЕШЕНИЕПОЧАСТОТЕ
Delta f = abs(f1 2-f2 2); % РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЧАСТОТАМИ
L = ceil(Fs/(Delta f-Delta N)); % ВЫБРАННАЯ ДЛИНА L
Delta L = Fs/L; % ПЕРИОД ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО ЧАСТОТЕ ПРИ ДЛИНЕ L
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода РАЗРЕШЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ Delta N,')
disp('% РАССТОЯНИЯ между ЧАСТОТАМИ Delta f,')
disp('% ДЛИНЫ L последовательности')
disp('% и ПЕРИОДА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО ЧАСТОТЕ Delta L нажмите
<ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp(['Delta N = ',num2str(Delta N)])
disp(['Delta f = ',num2str(Delta f)])
disp(['L = ',num2str(L)])
disp(['Delta L = ',num2str(Delta L)])
disp('%')
disp('%')
\mathbf{n} = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
w1 2 = 2*pi*f1 2/Fs; w2 2 = 2*pi*f2 2/Fs; % НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
x2 = A1*\cos(w1 \ 2*n) + A2*\cos(w2 \ 2*n); % KOHE4HAS
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
X2 = fft(x2); \% ДПФ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛИНЫ N
MOD2 = abs(X2); % MOДУЛЬ ДПФ
X2 L = fft(x2,L); \% ДПФ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ,
ДОПОЛНЕННОЙ
НУЛЯМИ ДО ДЛИНЫ L
MOD2 L = abs(X2 L); % MOДУЛЬ ДПФ
```

disp('% Для вывода ГРАФИКОВ N-ТОЧЕЧНОГО ДПФ и МОДУЛЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ') disp('% ПЛОТНОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПО L ТОЧКАМ, нажмите <ENTER>') pause $\mathbf{k} = 0$:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА ПРИ ДЛИНЕ N **k1** = 0:(L-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА ПРИ ДЛИНЕ L figure('Name','Discrete Harmonic Signal with Close Frequencies','NumberTitle', 'off') subplot(2,1,1), stem(k,MOD2), grid, xlabel('k') title(strcat(['DFT Modulus N = ',num2str(N)])) subplot(2,1,2), plot(k1,MOD2 L,'r','MarkerSize',3, 'Linewidth',2) grid, hold on, stem(k1,MOD2 L,':'), xlabel('k') title(streat(['Spectral Density Modulus L = ',num2str(L)])) L 2 = ceil(L/2); % ОСНОВНАЯ ПОЛОСА ЧАСТОТ L/2 [**MODm m**] = max(MOD2 L(1:(L 2))); % МАКСИМУМ МОDm И ИНДЕКС m BEKTOPA MOD2 L (ПЕРВЫЙ ПИК) \mathbf{k} 1 = (m-1); f 1 = k 1*Delta L; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ И АБСОЛЮТНАЯ (Гц) ЧАСТОТЫ ПЕРВОГО ПИКА $\mathbf{K} = \operatorname{ceil}(L/N);$ % КОЛИЧЕСТВО ОТСЧЕТОВ НА ПЕРИОДЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ Fs/N **K1** = m+K; **K2** = m+2*K-1; % НИЖНЯЯ К1 и ВЕРХНЯЯ К2 ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛА ПРИ ПОИСКЕ ВТОРОГО ПИКА СПРАВА [**MODm1 m1**]= max(MOD2 L(K1:K2)); % МАКСИМУМ MODm1 И ИНДЕКС m1 МОДУЛЯ ДПФ МОД2 L НА ИНТЕРВАЛЕ [К1 К2] **K3** = m-(2*K-1); **K4** = m-K; % НИЖНЯЯ К3 и ВЕРХНЯЯ К4 ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛА ПРИ ПОИСКЕ ВТОРОГО ПИКА СЛЕВА [**MODm2 m2**] = max(MOD2 L(K3:K4)); % МАКСИМУМ МОDm2 И ИНДЕКС m2 МОДУЛЯ ДПФ MOD2 L НА ИНТЕРВАЛЕ [K3 K4] if (MODm1>MODm2) \mathbf{k} 2 = (K1+m1-1)-1; f 2 = k 2*Delta L; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ И АБСОЛЮТНАЯ (Гц) ЧАСТОТЫ ВТОРОГО ПИКА, ЕСЛИ ОН СПРАВА ОТ ΠΕΡΒΟΓΟ else k 2 = (K3+m2-1)-1; f 2 = k 2*Delta L; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯИ АБСОЛЮТНАЯ (Гц) ЧАСТОТЫ ВТОРОГО ПИКА, ЕСЛИ ОН СЛЕВА ОТ ΠΕΡΒΟΓΟ

end disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ЧАСТОТ ГАРМОНИК нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['k 1 = ',num2str(k 1), 'f 1 = 'num2str(f 1)])disp(['k 2 = ',num2str(k 2),'f 2 = 'num2str(f 2)])disp('%') disp('%') disp('% Определите ЧАСТОТЫ ГАРМОНИК по ГРАФИКУ') disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.6. ВЫЧИСЛЕНИЕ КРУГОВОЙ СВЕРТКИ') disp('%') disp('%') disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ') DATA=0; while DATA==0 x3 = input('x3 = '); % ПЕРВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ x4 = input('x4 = '); % ВТОРАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end y34 = ifft(fft(x3).*fft(x4));% КРУГОВАЯ СВЕРТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ L34 = length(y34);<u>% ПЕРИОД КРУГОВ</u>ОЙ СВЕРТКИ disp('%') disp('%')disp('% Для вывода графиков ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ и КРУГОВОЙ свертки (3 периода) нажмите<ENTER>') pause figure('Name','Sequences x3, x4, v34','NumberTitle', 'off') subplot(3,1,1), stem((0:3*L34-1),... repmat(x3,1,3),'fill','Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid

```
xlabel('n'), title('Periodic Sequence x3(n)')
subplot(3,1,2), stem((0:3*L34-1), repmat(x4,1,3),'fill',
'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid
xlabel('n'), title('Periodic Sequence x4(n)')
subplot(3,1,3), stem((0:3*L34-1), repmat(y34,1,3),'fill',
'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid, xlabel('n')
title('Periodic Sequence y34(n) — Convolution with FFT and IFFT') disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.7. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СВЕРТКИ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
DATA=0;
while DATA==0
x5 = input('x5 = '); % ПЕРВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
x6 = input('x6 = '); % ВТОРАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
v56 1 = conv(x5,x6); % ЛИНЕЙНАЯ СВЕРТКА, ВЫЧИСЛЕННАЯ С
ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
conv
v56 2 = fftfilt(x5,x6); % ЛИНЕЙНАЯ СВЕРТКА, ВЫЧИСЛЕННАЯ С
ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
fftfilt
MAX = max([length(y56 1) length(y56_2)]); % МАКСИМАЛЬНАЯ ДЛИНА
СВЕРТКИ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ и ЛИНЕЙНОЙ
свертки нажмите
<ENTER>')
pause
figure('Name','Sequences x5, x6, y56 1, y56 2','NumberTitle', 'off')
subplot(4,1,1)
stem((0:length(x5)-1),x5,'fill','Linewidth',2,'MarkerSize',3)
```

```
grid, xlabel('n'), title('Sequence x5(n)'), xlim([0 MAX-1])
subplot(4,1,2)
stem((0:length(x6)-1),x6,'fill','Linewidth',2,'MarkerSize',3)
grid, xlabel('n'), title('Sequence x6(n)'), xlim([0 MAX-1])
subplot(4,1,3)
stem((0:length(y56 1)-1),y56 1,'fill','Linewidth',2,'MarkerSize',3)
grid, xlabel('n'), title('Sequence y56(n) — Convolution'), xlim([0 MAX-1])
subplot(4,1,4)
stem((0:length(y56 2)-1),y56 2,'fill','Linewidth',2,'MarkerSize',3)
grid, xlabel('n'), title('Sequence y56(n) — Convolution with FFT and IFFT'),
xlim([0 MAX-1])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ЛДС ПО ФОРМУЛЕ СВЕРТКИ')
disp('%')
disp('\%')
disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ')
DATA=0:
while DATA==0
\mathbf{b} = input('b = '); \% КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ
ФУНКШИИ
a = input('a = '); \% КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ
ФУНКШИИ
N1 = input('N1 = '); % ДЛИНА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
N2 = input('N2 = '); % ДЛИНА ВОЗДЕЙСТВИЯ
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
h = impz(b,a,N1)'; % ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
\mathbf{x7} = \text{input} 1(\text{N2}); \% \text{ВОЗДЕЙСТВИЕ}
v7 1 = conv(x7,h); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
conv
у7 2 = fftfilt(h,x7); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
fftfilt
L=N1+N2-1; % ДЛИНА СВЕРТКИ, ВЫЧИСЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ
ФУНКЦИИ conv
```

disp('%')disp('%') disp('% Для вывода графиков ИХ, ВОЗДЕЙСТВИЯ и РЕАКЦИИ нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Impulse Response, Input and Output Signals','NumberTitle', 'off') subplot(4,1,1)stem(0:length(h)-1,h,'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid, xlabel('n'), title('Impulse Response h(n)'), xlim([0 L-1]) subplot(4,1,2)stem(0:length(x7)-1,x7,'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), title('Input Signal x7(n)'), xlim([0 L-1]) subplot(4,1,3)stem(0:length(y7 1)-1,y7 1,'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), title('Output Signal v7(n) — Convolution'), xlim([0 L-1]) subplot(4,1,4)stem(0:length(y7 2)-1,y7 2,'Linewidth',2,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), title('Output Signal $\sqrt{7}(n)$ — Convolution with FFT and IFFT'), xlim([0 L-1]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.9. ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ЛДС МЕТОДОМ ПЕРЕКРЫТИЯ С НАКОПЛЕНИЕМ') disp('%') disp('%') disp('% Введите ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ') DATA=0; while DATA==0 **N3** = input('N3 = '); <u>% ДЛИНАВОЗДЕЙСТВИЯ</u> disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end

```
x8 = input_1(N3); <u>% ВОЗДЕЙСТВИЕ</u>
```

v8 1 = fftfilt(h,x8); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ fftfilt v8 2 = fftfilt(h,x8,N1); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ fftfilt МЕТОДОМ НАКОПЛЕНИЯ С ПЕРЕКРЫТИЕМ disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ и РЕАКЦИИ нажмите <ENTER>') pause figure('Name', 'Impulse Response, Input and Output Signals — Overlap-add method','NumberTitle', 'off') subplot(4,1,1)stem(0:length(h)-1,h,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), title('Impulse Response h(n)'), xlim([0 N3-1]) subplot(4,1,2), stem(0:length(x8)-1,x8,'MarkerSize',3), grid xlabel('n'), title('Input Signal x8(n)') subplot(4,1,3),stem(0:length(y8 1)-1,y8 1,'MarkerSize',3), grid xlabel('n') title('Output Signal v8(n) — Convolution with FFT and IFFT') subplot(4,1,4), stem(0:length(y8 2)-1,y8 2,'MarkerSize',3), grid xlabel('n') title('Output Signal y8(n) — Convolution with Overlap-add method') disp('%') disp('%') disp('% PAGOTA 3ABEPIIIEHA') 10.4.1. Используемые внешние функции В script-файле lr 10 используется внешняя функция input 1,

предназначенная для

моделирования воздействия (10.15), совпадающего с воздействием (8.18) (см. разд. 8.4.1).

10.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании functionфайлов с применением ДПФ в различных приложениях и исходных данных из табл. 10.1 для своего номера бригады N_{бр}.

Пункты самостоятельного задания включают в себя:

1С. Проверку равенства Парсеваля для конечной последовательности (10.11) с разными длинами N и M.

2С. Исследование эффекта растекания спектра

Выполнить для периодической последовательности (10.12) с произвольными значениями периода N и частоты f_1 .

Вывести значение Р (10.1) и сообщение о наличии/отсутствии эффекта растекания спектра.

При наличии эффекта растекания спектра применить требуемое окно и вывести графики амплитудного спектра последовательности до и после его применения.

Варианты весовых функций (окон) представить в виде векторовстолбцов:

WIN(:,1) = hamming(N);

WIN(:,2) = hanning(N);

ит. д. ИменаоконнайтивGUIWindowDesignandAnalysisTool (командаwintool).

3C. Улучшение различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами.

Выполнить для конечной последовательности x(n) (10.11) длины 2N при значениях частот $f_{12}=1,1f_1$ и $f_{22}=1,15f_1$.

4С. Вычисление круговой свертки с помощью ДПФ и ОДПФ.

Выполнить для последовательностей $x(n_1) = [0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]$ и $x(n_2) = [0; 0,5; 1; 0,5; 0]$. Вывести графики последовательностей и их круговой

свертки.

5С. Вычисление реакции ЛДС по формуле свертки с помощью ДПФ.

Выполнить для рекурсивного звена 2-го порядка с коэффициентами, заданными в табл. 10.1, и ИХ длины N₁.

В качестве воздействия выбрать последовательность с однотональной амплитудной модуляцией (7.23):

 $x(n) = C[1 + m\cos(\Omega n + \varphi_{\Omega})]\cos(\widehat{\omega}_0 n + \varphi_0)$

Задать значения C = 1, $\hat{\omega}_0 = 2\pi/4$, $\varphi_0 = 0$, $\Omega = \hat{\omega}_0/4$, $\varphi_\Omega = 0$, m = 0,5 и длину воздействия 2N.

Вывести графики ИХ, воздействия и реакции.

6С. Вычисление реакции ЛДС методом перекрытия с накоплением.

Выполнить с исходными данными п. 5С при длине воздействия 4N.

Вывести графики ИХ, воздействия и реакции.

10.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения каждого пункта задания, включая копируемые из окна **Command Window** результаты вычислений (шрифт Courier New), созданные графики (копируются по команде **Edit** | **Copy Figure** в окне **Figure**) и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Запишите равенство Парсеваля и поясните его смысл.
- 2. Что называют растеканием спектра?
- 3. При каких условиях наблюдается эффект растекания спектра?

4. Какие меры принимают для уменьшения эффекта растекания спектра?

5. Поясните, при каком расстоянии между частотами дискретных гармоник возможно их различение на основе ДПФ?

6. Как улучшить различение дискретных гармоник с близко расположенными частотами?

7. Запишите и поясните формулу круговой свертки.

8. Запишите и поясните формулу линейной свертки.

9. Поясните алгоритм вычисления круговой свертки на основе ДПФ.

10. Поясните алгоритм вычисления линейной свертки на основе ДПФ.

11. С какой целью вычисление реакции ЛДС по формуле свертки выполняется на основе ДПФ?

12. Поясните алгоритм вычисления реакции ЛДС по формуле свертки на основе ДПФ.

13. Поясните алгоритм вычисления реакции ЛДС методом перекрытия с накоплением.

Лабораторная работа №5 Синтез КИХ-фильтров методом окон

Цель работы: изучить процедуру синтеза КИХ-фильтров методом окон и овладеть программными средствами MATLAB для синтеза и анализа КИХ-фильтров; познакомиться с GUI WinTool (Window Design and Analysis Tool — средство создания и анализа окон) и GUI FVTool (Filter Visualization Tool — средство визуализации фильтра).

11.1. Краткая теоретическая справка

Цифровой фильтр (ЦФ) представляет собой линейную дискретную систему (ЛДС), выполняющую преобразование входной последовательности в выходную по алгоритму, описываемому разностным уравнением, который отображается заданной структурой, реализованной аппаратно, программно или аппаратно-программно.

Проектирование ЦФ выполняется в три этапа:

1. Синтез ЦФ, включающий следующие основные шаги:

1.1. Выбор типа ЦФ.

Двум типам ЛДС — нерекурсивная (КИХ) и рекурсивная (БИХ) — соответствуют два типа ЦФ:

КИХ-фильтр (FIR Filter — Finite Impulse Response Filter); БИХ-фильтр (IIR Filter — Infinite Impulse Response Filter).

1.2. Задание требований к характеристикам ЦФ.

Требования к характеристикам ЦФ зависят от его типа (КИХ или БИХ) и назначения ЦФ (частотно-избирательный, преобразователь Гильберта, дифференциатор, амплитудный или фазовый корректор и т. д.).

По умолчанию подразумевают *частотно-избирательные* ЦФ, выполняющие селекцию спектральных составляющих входной последовательности.

Выделяют четыре основных типа избирательности ЦФ:

ФНЧ — фильтр нижних частот (Lowpass Filter);

ФВЧ — фильтр верхних частот (Highpass Filter);

ПФ — полосовой фильтр (Bandpass Filter);

 $P\Phi$ — режекторный фильтр (Bandstop Filter).

1.3. Выбор метода синтеза.

Метод синтеза зависит от типа ЦФ (КИХ или БИХ), а в рамках одного типа — от специфики дополнительных требований (простоты метода, оптимальности проектируемого фильтра и др.).

1.4. Расчет передаточной функции ЦФ.

- 1.5. Выбор структуры ЦФ.
- 2. Моделирование структуры ЦФ с учетом эффектов квантования.
- 3. Реализация структуры ЦФ.

Структура ЦФ может быть реализована на базе цифрового устройства — цифрового процессора обработки сигналов (ЦПОС), программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и т. п.

Рассмотрение этого этапа выходит за рамки данной книги.

11.1.1. Свойства КИХ-фильтров

КИХ-фильтр описывается передаточной функцией H(z) (см. (8.3)):

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-1} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$$
11.1)

Длиной и порядком КИХ-фильтра называют соответственно число коэффициентов N и порядок R передаточной функции, равный:

$$R = N - 1 \tag{11.2}$$

КИХ-фильтры характеризируются следующими особенностями:

устойчивостью по определению.

Линейная ФЧХ (с точностью до скачков на π)¹ КИХ-фильтра обеспечивается в том случае, если для его импульсной характеристики (ИХ) h n() выполняется одно из условий: % симметрии:

$$h(n) = h(N - 1 - n);$$
 11.3)

*S*антисимметрии:

$$h(n) = -h(N - 1 - n),$$
 11.4)

где ось симметрии/антисимметрии ИХ h(n) проходит через точку n=R/2.

По двум признакам — симметрии/антисимметрии ИХ и четности/нечетности порядка R выделяют четыре типа КИХ-фильтров с ЛФЧХ (табл. 11.1), на базе которых синтезируется ЦФ.

Помимо частотно-избирательных ЦФ, в табл. 11.1 включены два специальных КИХ-фильтра — цифровой преобразователь Гильберта (ЦПГ) и цифровой дифференциатор (ЦД) [1].

Тип КИХ-фильтра	ЛФЧХ (с точностью до скачков на <i>п</i>)	ЦФ
Тип 1 (Туре-1): порядок R — четный; ИХ h(n) — симметричная	$\phi(\omega) = -\frac{\widehat{\omega}R}{2}$	ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ

Таблица 11.1. Четыре типа КИХ-фильтров с ЛФЧХ

Тип 2 (Туре-2): порядок R — нечетный; h(n) — симметричная	$\phi(\omega) = -\frac{\widehat{\omega}R}{2}$	ФНЧ, ПФ
Тип 3 (Туре-3): порядок R — четный; h(n) — антисимметричная; $p = \left(\frac{R}{2}\right) = 0$	$\phi(\widehat{\omega}) = \frac{\pi}{2} - \frac{\widehat{\omega}R}{2}$	ПФ ЦПГ ЦД
Тип 4 (Туре-4): порядок R — нечетный; h(n) — антисимметричная	$\phi(\widehat{\omega}) = \frac{\pi}{2} - \frac{\widehat{\omega}R}{2}$	ФВЧ, ПФ ЦПГ ЦД

11.1.2. Задание требований к АЧХ

Методы синтеза частотно-избирательных КИХ-фильтров изначально предполагают ЛФЧХ, поэтому требования задаются к нормированной АЧХ $\tilde{A}(f)$ в основной полосе частот [0; $f_{d}/2$]и включают в себя:

ПЗ), для которых введены условные обозначения:

- f_χ граничная частота ПП для ΦНЧ и ΦВЧ;
- f_k граничная частота ПЗ для ФНЧ и ФВЧ;
- $f_{-\chi}, f_{\chi}$ левая и правая граничные частоты ПП для ПФ и РФ;
 - f_{-k}, f_k левая и правая граничные частоты ПЗ для ПФ и РФ;

 \Re максимально допустимые отклонения АЧХ $\hat{A}(f)$, для которых введены условные обозначения:

- ^δ₁ от единицы в ПП (для ФНЧ, ФВЧ и ПФ);
- ^δ₂ от нуля в ПЗ (для ФНЧ, ФВЧ и РФ);
- δ_{11}^{2} от единицы в левой полосе пропускания ПП1 (для РФ);
- δ_{12}^{δ} от единицы в правой полосе пропускания ПП2 (для РФ);
- δ_{21} от нуля в левой полосе задерживания ПЗ1 (для ПФ);
 - δ_{22}^{δ} от нуля в правой полосе задерживания ПЗ2 (для ПФ).

На рис. 11.1—11.4 приведены примеры идеальной АЧХ и требований к АЧХ для фильтров различного типа избирательности.

Требования могут задаваться к АЧХ в децибелах — к характеристике ослабления:

$$\hat{A}(f)(\mathsf{q}\mathsf{B}) = 20 \lg(\hat{A}(f))$$
 11.5)

или к характеристике затухания:

$$\hat{A}(f)(\mathsf{д}\mathsf{E}) = 20\lg(\hat{A}(f)) \tag{6}$$

11.6)

В МАТLАВ требования задаются к характеристике затухания — АЧХ (дБ).



Рис. 11.2. Идеальная АЧХ ФВЧ (а), требования к АЧХ ФВЧ (б)



Рис. 11.3. Идеальная АЧХ ПФ (а), требования к АЧХ ПФ (б)



Рис. 11.4. Идеальная АЧХ РФ (а), требования к АЧХ (б) РФ (б)

В требованиях к характеристике затухания (11.6) вместо значений максимально допустимых отклонений δ_1 , δ_2 , δ_{11} , δ_{12} и δ_{22} задаются:

• a_{max} (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП (для ФНЧ, ФВЧ и ПФ);

• а_{тіп} (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ (для ФНЧ, ФВЧ и РФ);

• а_{1 max} (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП1 (для РФ);

• а_{2 max} (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП2 (для РФ);

• а_{1 min} (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ1 (для ПФ);

• $a_{2 \min} (дБ)$ — минимально допустимое затухание в ПЗ2 (для ПФ).

На рис. 11.5 приведен пример требований к характеристике затухания ФНЧ.



Рис. 11.5. Требования к характеристике затухания ФНЧ

Взаимосвязь между значениями максимально допустимых отклонений и их соответствующими значениями в децибелах, например, между δ_1 и δ_2 и a_{max} и a_{min} устанавливается формулами:

$$a_{max} = -20 \lg (1 - \sigma_1) (дБ)$$
 11.7)

$$a_{min} = -20 \lg(\sigma_2) (\mathrm{d}\mathrm{B})$$
 (11.8)

и наоборот:

$$\sigma_1 = 1 - 10^{-a_{max}/20}$$
 11.9)

$$\sigma_2 = 10^{-a_{min}/20} \tag{(11.10)}$$

11.1.3. Структуры КИХ-фильтров

Структура (структурная схема) ЦФ отображает алгоритм вычисления реакции по разностному уравнению и определяется видом передаточной функции.

Структурные схемы КИХ-фильтров с ЛФЧХ приведены на рис. 11.6.

В МАТLАВ структура КИХ-фильтра с ЛФЧХ описывается в виде объекта dfilt:

Hd = dfilt.structure(b)

где Hd — имя объекта dfilt; dfilt — тип объекта; structure — функция, задающая конкретную структуру объекта Hd (табл. 11.2); b — параметр функции structure — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1).

Для КИХ-фильтров свойства объекта dfilt, выводимые по его имени, включают в себя:

S Numerator — коэффициенты передаточной функции;

SpersistentMemory — начальные условия при вычислении реакции; значение false соответствует ННУ (см. разд. 8.1).

При синтезе КИХ-фильтров с ЛФЧХ методом окон ИХ может быть только симметричной, чему соответствует структура Direct-Form Symmetric FIR.

Функция structure	Параметр функции structure	Структура КИХ-фильтра
dffir	b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1)	Direct-Form FIR (прямая)
dfsymfir	b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1), симметричных относительно N/2	Direct-Form Symmetric FIR (прямая приведенная с симметричной ИХ, см. рис. 11.6, a)
dfasymfir	b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1),	Direct-Form Antisymmetric FIR (прямая приведенная с

Таблица 11.2. Функции structure и структуры КИХ-фильтров с ЛФЧХ

антисимметричных	антисимметричной ИХ, см.
относительно N/2; при четном	рис. 11.6, б)
N - b(N/2) = 0	



Рис. 11.6. Структурные схемы КИХ-фильтров с ЛФЧХ: прямая приведенная с симметричной ИХ (Direct-Form Symmetric FIR) для КИХ-фильтра 1-го типа длины N = 7 (а); прямая приведенная с антисимметричной ИХ (Direct-Form Antisymmetric FIR) для КИХ-фильтра 3-го типа длины N = 7 ($b_2 = 0$) (б)

11.1.4. Процедура синтеза КИХ-фильтров методом окон

В общем случае синтез ЦФ заключается в расчете передаточной функции. Согласно (11.1), синтез КИХ-фильтра сводится к расчету его импульсной характеристики.

Процедура синтеза КИХ-фильтра методом окон является итерационной и включает в себя следующие шаги¹:

1. Задание требований к АЧХ.

2. Оценка порядка фильтра R и выбор окна.

Оценкой порядка R называют начальное значение порядка в итерационной процедуре синтеза фильтра.

Окном называют весовую функцию w(n) — вещественную неотрицательную последовательность длины N = R + 1, максимальную в центре и монотонно спадающую к границам. Для стандартных окон MATLAB значения w(n) вычисляются автоматически по известным аналитическим формулам.

3. Расчет импульсной характеристики идеального фильтра $h(n_u)$, симметрично усеченной до длины N = R + 1 (выделенной окном Дирихле).

Импульсная характеристика h(n_и) может быть только симметричной и рассчитывается автоматически по известным для идеальных ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ аналитическим формулам. Обязательным параметром усеченной ИХ h(n_и) является частота разрыва (отсечки), на которой нормированная АЧХ равна 0,5.

Для ФНЧ и ФВЧ указывается одна частота разрыва, равная:

$$f_c = \frac{f_{\chi} + f_k}{2} \tag{(11.11)}$$

а для ПФ и РФ — две (левая и правая), равные:

$$f_{c1} = \frac{f_{-k} + f_{-\chi}}{2} \tag{11.12}$$

$$f_{c2}\frac{f_k + f_{\chi}}{2}$$
 (11.13)

4. Расчет импульсной характеристики реального фильтра с симметричной h(n) длины N в виде произведения:

$$h(n) = h_{\rm M}(n)w(n)$$

5. Проверка выполнения требований к АЧХ.

Проверка заключается в сравнении фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ от идеальной АЧХ в ПП и ПЗ с заданными максимально допустимыми отклонениями.

Возможны две ситуации.

Требования к АЧХ не выполняются.

В этом случае следует увеличить порядок R и вернуться к пп. 3—5.

¹ С теоретическими основами метода окон можно познакомиться в [2, 3].

• Требования к АЧХ выполняются.

В этом случае следует уменьшить порядок R и вернуться к пп. 3—5.

В обоих случаях увеличение/уменьшение порядка R продолжается до тех пор, пока не будет найден минимальный порядок R_{min}, при котором выполняются требования к АЧХ.

6. Выбор структуры КИХ-фильтра.

11.1.5. Синтез КИХ-фильтров методом окон в МАТLАВ

Основной проблемой синтеза КИХ-фильтров методом окон является оценка порядка фильтра R (длины окна N = R+1) по заданным требованиям к AЧХ. В общем случае он может задаваться произвольно, а затем уточняться при проверке выполнения требований к АЧХ. Однако эта задача успешно решена для окна Кайзера, где порядок фильтра и требования к АЧХ связаны аналитической зависимостью [1, 2]. Поэтому далее процедура синтеза КИХ-фильтра методом окон рассматривается с применением окна Кайзера.

Синтез КИХ-фильтров методом окон с произвольным окном выполняется с по- мощью функции:

b = fir1(R,wc,ftype,win,normalizasion)

где R — порядок КИХ-фильтра R(11.2); wc — вектор нормированных частот разрыва (*см. разд. 11.1.4*):

\$%для ФНЧ и ФВЧ — с одним элементом wc(1), равным

$$\hat{f}_c = \frac{f_c}{f_{\rm A}/2}$$
 (11.14)

இдля ПФ и РФ — с двумя элементами wc(1) и wc(2), соответственно равными:

$$\hat{f}_{c1} = \frac{f_{c1}}{f_{\rm A}/2} \tag{11.15}$$

$$\hat{f}_{c2} = \frac{f_{c2}}{f_{\rm A}/2} \tag{11.16}$$

ftype — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

%;'high' — для ФВЧ;

%;'stop' — для РФ;

по умолчанию (если значение параметра не задано), синтезируется ФНЧ или ПФ. win — имя стандартной функции для расчета окна w(n) длины N R=+1; для окна Кайзера — kaiser(R+1,beta), где beta — параметр β окна Кайзера.

normalizasion — параметр (флаг), управляющий нормированием АЧХ таким образом, чтобы обеспечить ее значение, равное единице, в центре ПП (для РФ — в центре ПП1), и принимающий значения:

\$%'scale' (по умолчанию) — нормирование выполняется;

%'noscale' — нормирование не выполняется;

b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1) длины N = R+1.

Для окна Кайзера входные параметры функции fir1 — порядок R и вектор wc, а также тип избирательности ftype и параметр окна Кайзера beta — определяются по заданным требованиям к АЧХ с помощью функции:

[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs)

где f — вектор граничных частот ПП и ПЗ в порядке их следования слева направо в шкале частот f (Гц) в основной полосе частот[0; $f_{\rm d}/2$]; m — вектор значений идеальной АЧХ (единица — в ПП и нуль — в ПЗ) в порядке их следования слева направо; соблюдается условие length(f) = 2*length(m)-2; ripple — вектор максимально допустимых отклонений АЧХ в порядке их следования слева направо; Fs — частота дискретизации $f_{\rm d}$ (Гц); R — оценка порядка фильтра Rc точностью до ±2; wc — вектор, определенный ранее для функции fir1; beta — параметр β окна Кайзера; ftype — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

- 'low' для ФНЧ;
- 'high' для ФВЧ;
- 'DC-0' дляПФ;
- 'stop' для РФ.

11.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с синтезом КИХ-фильтров методом окон с применением окна Кайзера, описанием их структур и анализом характеристик с использованием программных средств MATLAB.

11.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файлов lr_11_low, lr_11_high, lr_11_pass и lr_11_stop и function-файлов check_low, check_high, check_pass, check_stop и plot_fir, которые хранятся на прилагаемом компактдиске в папке

LAB_DSP\LAB_11.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_11 по команде контекстного меню Add to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 11.3—11.6 для номера бригады N_{6p} , где $N_{6p} = 1, 2,...,30$, и включают в себя требования к АЧХ КИХфильтров ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ.

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\Tables_11 хранятся табл. 11.3—11.6 исходных данных, примеры их заполнения для $N_{\delta p} = 1$ и табл. 11.7 для п. 2 задания.

Таблица 11.3.	Требования к	АЧХ ФНЧ
---------------	--------------	---------

Услов ные обозначения	Список требований	Задава емые значения	Идентифи катор
$f_{\scriptscriptstyle m I}$	Частота дискретизации	$f_{\rm A}$ = 5000 100+ N _{6p}	Fs =

f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_x = \frac{f_{\pi}}{10} + 20N_{\text{6p}}$	ft =
f _k	Граничная частота ПЗ	f_k $= \frac{f_{\pi}}{10} + 250$ $+ 25N_{6p}$	fk =
δ_1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	d1 = 0.05
δ_2	Максимально допустимое отклонение в ПЗ	$\delta_2 = 0,01$	d2 = 0.01

Таблица 11.4. Требования к АЧХ ФВЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_{A}	Частота дискретизации	$f_{\pi} = 5000 + 100$ N _{6p}	Fs =
f _k	Граничная частота ПЗ	$f_x = \frac{f_{\pi}}{10} + 20N_{\text{6p}}$	fk =
f_{χ}	Граничная частота ПП	f_k $= \frac{f_{\pi}}{10} + 250$ $+ 25N_{\text{6p}}$	ft =

Таблица 11.4 (окончание)

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
δ_2	Максимально	$\delta_2 = 0,01$	d2 = 0.01
	допустимое		
	отклонение в		
	П3		

δ1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	d1 = 0.05
таолица 11.5.	треоования к Ач	1Λ ΠΨ	
Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
$f_{\scriptscriptstyle m I}$	Частота дискретизации	f_{π} =5000 + 100 N _{6p}	Fs =
f_k	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\pi}}{20} + 20N_{\text{6p}}$	fk1 =
<i>f</i>	Граничная частота ПП1	$f_{-\chi} = \frac{f_{\pi}}{20} + 250 + 25N_{\text{6p}}$	ft1 =
f_{χ}	Граничная частота ПП2	$f_{\chi} = \frac{f_{\pi}}{4} + 25N_{6p}$	ft2 =
fκ.	Граничная частота ПЗ2	f_k $= \frac{f_{\pi}}{4} + 250$ $+ 30N_{6p}$	fk2 =
δ_{21}	Максимально допустимое отклонение в ПЗ1	δ ₂₁ = 0,01	d21 = 0.01
δ1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	d1 = 0.05
δ ₂₂	Максимально допустимое отклонение в ПЗ2	δ ₂₂ =0,01	d22 = 0.01

Таблица 11.6. Требования к АЧХ РФ

Условные	Список	Задаваемые	Идентифика-
обозначения	требований	значения	тор

fд	Частота дискретизации	$f_{\pi} = 5000 + 100$ N _{6p}	Fs =
$f_{-\chi}$	Граничная частота ПП1	$f_{-x} = \frac{f_{\pi}}{20} + 20N_{6p}$	ft1 =
f _{-k}	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\rm A}}{20} + 250 + 25N_{\rm 6p}$	fk1 =

Таблица 11.6 (окончание)

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентифика- тор
$f_{\rm k}$	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_{\pi}}{4} + 25N_{\text{6p}}$	fk2 =
f_{χ}	Граничная частота ПП2	f_{χ} $= \frac{f_{\pi}}{4} + 250$ $+ 30N_{6p}$	ft2 =
δ11	Максимально допустимое отклонение в ПП1	$\delta_1 = 0,05$	d11 = 0.05
δ_2	Максимально допустимое отклонение в ПЗ	$\delta_2 = 0,01$	d2 = 0.01
δ12	Максимально допустимое отклонение в ПП2	$\delta_2^{=}$ 0,05	d12 = 0.05

Задание на лабораторную работу заключается в синтезе КИХ-фильтров методом окон с применением окна Кайзера и анализе их характеристик и для

каждого типаизбирательности (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) включает в себя выполнение следующих пунктов:

1. Ввод требований к АЧХ.

2. Вычисление оценки порядка КИХ-фильтра, нормированных частот разрыва и параметра β окна Кайзера.

Выведенные значения нормированных частот разрыва (wc) и параметра β (beta) внести в табл. 11.7.

Пояснить:

• какая функция используется для вычисления оценки порядка КИХфильтра, нормированных частот разрыва и параметра β;

с какой целью рассчитывается оценка порядка КИХ-фильтра;

как рассчитываются частоты разрыва в шкале частот $f(\Gamma$ ц).

Таблица 11.7. Результаты синтеза КИХ-фильтров методом окон

Тип	Метод окон с окном Кайзера			
избирательности фильтра	поряд ок фильтра R	вектор нормированных частот разрыва wc	пара метр beta	
ФНЧ				
ФВЧ				
ПФ				
РФ				

3. Синтез КИХ-фильтра методом окон.

Для синтеза КИХ-фильтра организовать цикл, в теле которого выполнить следующие действия:

синтезировать КИХ-фильтр;

проверить выполнение требований к АЧХ.

Для проверки выполнения требований к АЧХ вывести и сравнить фактические максимальные (по модулю) отклонения в ПП и ПЗ с заданными максимально допустимыми отклонениями.

Для вывода фактических максимальных по модулю отклонений использовать созданные function-файлы (*см. разд. 11.4.5*);

• по результатам проверки, увеличивая или уменьшая порядок КИХфильтра, определить его минимальный порядок, при котором выполняются требования к АЧХ.

При увеличении/уменьшении порядка КИХ-фильтра необходимо учитывать соответствие между типом избирательности ЦФ и типом КИХ-фильтра

(см. табл. 11.1).
Полученное в результате итерационной процедуры значение порядка R КИХфильтра внести в табл. 11.7.

Пояснить:

%смысл итерационной процедуры синтеза;

4. Анализ характеристик КИХ-фильтра.

Для вывода графиков ИХ, АЧХ и ФЧХ КИХ-фильтра использовать functionфайл plot_fir (*см. разд. 11.4.5*).

Пояснить:

⊛вид ИХ;

\$Вид АЧХ в ПП и ПЗ (воспользуйтесь кнопкой **Zoom in** на панели \$\$инструментов); вид ФЧХ.

5. Описание структуры КИХ-фильтра в виде объекта dfilt с именами:

*S*_Flowpass — ФНЧ;

 $F_highpass - \Phi B \Psi;$

 $F_{\rm bandpass} - \Pi \Phi;$

 $F_bandstop - P\Phi$.

Пояснить:

что отображает структура и чем определяется ее вид;

• свойства объекта dfilt.

6. Знакомство с GUI FVTool.

Обратиться к GUI FVTool по команде: fvtool(Hd)

где Hd — имя объекта dfilt, и проанализировать характеристики синтезированных КИХ-фильтров.

7. Знакомство с GUI WinTool.

Для знакомства с окнами и их характеристиками обратиться к GUI WinTool по команде:

wintool

11.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должны быть представлены табл. 11.3—11.6 исходных

данных для своего номера бригады бр N.

Для четырех типов избирательности КИХ-фильтра — ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ — соз-

даны четыре script-файла. Для запуска script-файла к нему необходимо обратиться

поимени: >>lr_11_low— ФНЧ >>lr_11_high— ФВЧ >> lr 11 pass — ПФ >>lr_11_stop—P Φ

Листинги данных script-файлов представлены в разд. 11.4.1—11.4.4.

Для *принудительного снятия* script-файла с выполнения следует нажать комбина-

цию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками не закрывать.

11.4.1. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФНЧ

Листинг script-файлаlr_11_low имеет вид:

>> type lr_11_low

script

clc

clear

disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ МЕТОДОМ ОКОН') disp('%') disp('%') disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ФНЧ') disp('%')disp('%') disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ') DATA=0: while DATA==0; Nb = input('Nb = ');% НОМЕРБРИГАДЫ Fs = input('Fs = ');% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц) ft = input('ft = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц) $\mathbf{fk} = \text{input}(\text{'fk} = \text{'});\%$ ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц) d1 = input('d1 = '):% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП d2 = input('d2 = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')

pause

```
m = [1 0]; <u>% ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ</u> ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [ft fk];% BEKTOP ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d1 d2];% ВЕКТОР МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs);% ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОКНА
КАЙЗЕРА
disp(['R = 'num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc = ' num2str(wc)]) % HOPMИPOBAHHAЯ ЧАСТОТА РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ')
ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% ДлясинтезаКИХ-фильтраФНЧнажмите<ENTER>')
pause
b1 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫКИХ-
ФИЛЬТРА
ФНЧ
disp('%')
disp('%')
disp(['СинтезированКИХ-фильтрФНЧпорядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПП (dp) и ПЗ (ds) и ЗАДАННЫХ отклонений d1 и d2 нажмите
<ENTER>')
pause
[dp,ds] = check low(b1,ft,fk,Fs);% ВЫЧИСЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ
ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПП И ПЗ
disp('%')
```

```
disp(['dp = 'num2str(dp) '
                                            ds = 'num2str(ds)])
disp(['d1 = 'num2str(d1) '
                                            d2 = 'num2str(d2)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> '):
if ORDER==0
\mathbf{R} = input(\mathbf{R} = \mathbf{N}); \% ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
disp('%')
disp(['Синтезирован ФНЧ минимального порядка R = 'num2str(R)])
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Lowpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase', 'NumberTitle', 'off')
plot fir(R,b1,Fs)% ПОСТРОЕНИЕГРАФИКОВИХ, АЧХиФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F lowpass = dfilt.dfsymfir(b1) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ФНЧ
disp('%')
```

disp('%') disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗАВЕРШЕН')

```
11.4.2. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФВЧ
     Листинг script-файлаlr 11 high имеет вид:
>> type lr 11 high
script
clc
clear
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ МЕТОДОМ ОКОН')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ФВЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')
DATA=0;
while DATA==0:
Nb = input('Nb = ');
                         % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
\mathbf{fk} = \text{input}(\text{'fk} = \text{'}); \% \Gamma PAHUYHAЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц))
ft = input('ft = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц)
d2 = input('d2 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ
d1 = input('d1 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
```

```
m = [0 1];% ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
\mathbf{f} = [fk ft]; % ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d2 d1]; % BEKTOP МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОКНА
КАЙЗЕРА
disp(['R = 'num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc = ' num2str(wc)]) % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ')
ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ:
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% ДлясинтезаКИХ-фильтраФВЧнажмите<ENTER>')
pause
b2 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ
КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ
disp('%')
disp('\%')
disp(['Синтезирован КИХ-фильтр \PhiВЧ порядка R = 'num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПЗ (ds) и ПП (dp) и ЗАДАННЫХ отклонений d2 и d1 нажмите
<ENTER>')
pause
[ds,dp] = check high(b2,fk,ft,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ
ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПЗ И ПП
disp('%')
disp(['ds = 'num2str(ds) ']
                           dp = 'num2str(dp)])
disp(['d2 = 'num2str(d2)'])
                            d1 = 'num2str(d1)])
```

disp('%')disp('%') disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ') disp('%') disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1') disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R') **ORDER** = input('--> '); if ORDER==0 **R**= input('R = ');% ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА whilerem(R,2)~=0 disp('% Порядок фильтра выбран НЕПРАВИЛЬНО') R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА end end end disp('%')disp([' Синтезирован $\Phi B \Psi$ минимального порядка R = ' num2str(R)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>') pause figure('Name','Highpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude, **Phase'**, 'NumberTitle', 'off') plot fir(R,b2,Fs)% ПОСТРОЕНИЕГРАФИКОВИХ, АЧХиФЧХ disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ В ВИДЕ **ОБЪЕКТА dfilt**') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>') pause

F highpass = dfilt.dfsymfir(b2) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ФВЧ disp('%') disp('%') disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗАВЕРШЕН') 11.4.3. Синтез и анализ КИХ-фильтра ПФ Листинг script-файлаlr 05 pass имеет вид: >> type lr 11 pass script clc clear disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ МЕТОДОМ ОКОН') disp('%') disp('%') disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ПФ') disp('%') disp('%') disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ') DATA=0; while DATA==0; **Nb** = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц) $\mathbf{fk1} = input('fk1 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 (Гц)$ ft1 = input('ft1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 (Гц)ft2 = input('ft2 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП2 (Гц)) $\mathbf{fk2} = input('fk2 = '); \%$ ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц) **d21** = input('d21 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В П31 **d1** = input('d1 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП **d22** = input('d22 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В П32 disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')

```
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
m = [0 1 0]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [fk1 ft1 ft2 fk2];% BEКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d21 d1 d22]; % BEKTOP МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОКНА
КАЙЗЕРА
disp(['R = ' num2str(R)])% ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc(1) = 'num2str(wc(1)) 'wc(2) = 'num2str(wc(2))]) % BEKTOP
НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ')
ORDER = 0; <u>% ПРИЗНАК ОП</u>ТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% ДлясинтезаКИХ-фильтраПФнажмите<ENTER>')
pause
b3 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ
КИХ-ФИЛЬТРА ПФ
disp('%')
disp('\%')
disp([' Синтезирован КИХ-фильтр ПФ порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПЗ1 (ds1), ПП (dp) и ПЗ2 (ds2) и ЗАДАННЫХ отклонений d21, d1 и
d22
нажмите <ENTER>')
pause
```

```
[ds1,dp,ds2] = check pass(b3,fk1,ft1,ft2,fk2,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ
ФА<u>КТИЧЕСКИХ</u>
МАКСИМАЛЬНЫХ ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПЗ1, ПП И ПЗ2
disp('%')
disp(['ds1='num2str(ds1)'dp='num2str(dp)'ds2='
num2str(ds2)])
disp(['d21 = 'num2str(d21) 'd1 = 'num2str(d1) 'd22 = '
num2str(d22)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R = input('R = '); \% ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
disp('%')
disp([' Синтезирован ПФ минимального порядка \mathbf{R} = ' num2str(\mathbf{R})])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name', 'Bandpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase', 'NumberTitle', 'off')
plot fir(R,b3,Fs)% ПОСТРОЕНИЕГРАФИКОВИХ, АЧХиФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
```

```
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F bandpass = dfilt.dfsymfir(b3) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ПФ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗАВЕРШЕН')
11.4.4. Синтез и анализ КИХ-фильтра РФ
Листинг script-файлаlr 11 stop имеет вид:
>> type lr 11 stop
script
clc
clear
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ МЕТОДОМ ОКОН')
disp('\%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ РФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')
DATA=0:
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
ft1 = input('ft1 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 (Гц)
fk1 = input('fk1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 (Гц)
fk2 = input('fk2 = '); <u>% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц)</u>
ft2 = input('ft2 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП2 (Гц)
d11 = input('d11 = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПП1
d2 = input('d2 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ
d12 = input('d12 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПП2
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('--> ');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
```

pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>') pause **m** = [1 0 1]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ $\mathbf{f} = [ft1 fk1 fk2 ft2]; % ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ$ ripple = [d11 d2 d12]; % BEKTOP МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ **[R,wc,beta,ftype]** = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКНА КАЙЗЕРА disp(['R = ' num2str(R)])% ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА disp(['wc(1) = 'num2str(wc(1)) 'wc(2) = 'num2str(wc(2))]) % BEKTOP НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ РАЗРЫВА disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ') ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0 — НЕОПТИМАЛЬНЫЙ; 1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ while ORDER==0; disp('%') disp('%') disp('% ДлясинтезаКИХ-фильтраРФнажмите<ENTER>') pause b4 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫКИХ-ФИЛЬТРА РФ disp('%') disp('%') disp([' Синтезирован КИХ-фильтр РФ порядка R = ' num2str(R)]) disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')

```
disp('% в ПП1 (dp1), ПЗ (ds) и ПП2 (dp2) и ЗАДАННЫХ отклонений d11, d2 и
d12
нажмите <ENTER>')
pause
[dp1,ds,dp2] = check stop(b4,ft1,fk1,fk2,ft2,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ
<u>ФАКТИЧЕ</u>СКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПП1, ПЗ И ПП2
disp('\%')
disp(['dp1='num2str(dp1)'ds='num2str(ds)'dp2='
num2str(dp2)])
disp(['d11 = 'num2str(d11) ' d2 = 'num2str(d2) ' d12 = '
num2str(d12)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
while rem(R,2) \sim = 0
disp('% Порядок фильтра выбран НЕПРАВИЛЬНО')
\mathbf{R} = input(\mathbf{R} = \mathbf{N}); \% ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
end
disp('\%')
disp([' Синтезирован РФ минимального порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА РФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Bandstop FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase', 'NumberTitle', 'off')
plot fir(R,b4,Fs)% ПОСТРОЕНИЕГРАФИКОВИХ, АЧХиФЧХ
```

disp('%') disp('%')

disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗАВЕРШЕН')

11.4.5. Используемые внешние функции

В script-файлах lr_11_low, lr_11_high, lr_11_pass и lr_11_stop используются пять внешних функций.

Внешняя функция check_low, предназначенная для вычисления фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ФНЧ в ПП (dp) и ПЗ (ds):

```
function [dp,ds] = check low(b,ft,fk,Fs)
% Проверка выполнения требований к АЧХ ФНЧ
%
% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ФНЧ
% ft, fk — граничные частоты (Гц) ПП и ПЗ
% Fs — частота дискретизации (Гц)
%
% dp, ds — максимальные отклонения АЧХ в ПП и ПЗ
%
% fp, fs — векторы частот (Гц) для ПП и ПЗ (густая сетка)
% Н — частотная характеристика
% а = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
%
a = [1];
fp = 0:ft/1000:ft;
\mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fp},\text{Fs});
dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
fs = fk:(Fs/2-fk)/1000:Fs/2;
\mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,fs,Fs);
\mathbf{ds} = \max(abs(H));
```

Внешняя функция check_high, предназначенная для вычисления фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ФВЧ в ПЗ (ds) и ПП (dp):

```
function [ds,dp] = check high(b,fk,ft,Fs)
     % Проверка выполнения требований к АЧХ ФВЧ
     %
     % b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ФВЧ
     % fk,ft — граничные частоты (Гц) ПЗ и ПП
     % Fs — частота дискретизации (Гц)
     %
     % ds,dp — максимальные отклонения АЧХ в ПЗ и ПП
     % fs,fp — векторы частот (Гц) для ПЗ и ПП (густая сетка)
     % Н — частотная характеристика
     % а = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
     %
     a = [1];
     fs = 0:fk/1000:fk;
     \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,fs,Fs);
     ds = max(abs(H));
     fp = ft:(Fs/2-ft)/1000:Fs/2;
     \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fp},\text{Fs});
     dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
     Внешняя функция check pass, предназначенная для вычисления
фактических
     максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ПФ в ПЗ1
(ds1), ПП
     (dp) иП32 (ds2):
     function [ds1,dp,ds2] = check_pass(b,fk1,ft1,ft2,fk2,Fs)
     % Проверка выполнения требований к АЧХ ПФ
     %
     % b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ПФ
     % fk1,ft1,ft2,fk2 — граничные частоты (Гц) П31,ПП и П32
     % Fs — частота дискретизации (Гц)
     %
     % ds1,dp,ds2 — максимальные отклонения АЧХ в ПЗ1, ПП и ПЗ2
     % fs1,fp,fs2 — векторы частот (Гц) для ПЗ1, ПП и ПЗ2 (густая сетка)
     % Н — частотная характеристика
     % а=[1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
     %
     a = [1];
```

fs1 = 0:fk1/1000:fk1;H = freqz(b,a,fs1,Fs); ds1 = max(abs(H));

```
fp = ft1:(ft2-ft1)/1000:ft2;
      \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fp},\text{Fs});
      dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
      fs2 = fk2:(Fs/2-fk2)/1000:Fs/2;
      \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fs2},\text{Fs});
      ds2 = max(abs(H));
      Внешняя функция check stop, предназначенная для вычисления
фактических
      максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра РФ в ПП1
(dp1), ПЗ
      (ds) иПП2 (dp2):
      function [dp1,ds,dp2] = check stop(b,ft1,fk1,fk2,ft2,Fs)
      % Проверка выполнения требований к АЧХ РФ
      %
      % b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра РФ
      % ft1,fk1,fk2,ft2 — граничные частоты ПП1, ПЗ и ПП2
      % Fs — частота дискретизации (Гц)
      %
      % dp1,ds,dp2 — максимальные отклонения АЧХ в ПП и ПЗ
      % fp1,fs,fp2 — векторы частот (Гц) для ПП1, ПЗ и ПП2 (густая сетка)
      % Н — частотная характеристика
      % а = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
      %
      a = [1];
      fp1 = 0:ft1/1000:ft1;
      \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fp1},\text{Fs});
      dp1 = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
      fs = fk1:(fk2-fk1)/1000:fk2;
      \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,fs,Fs);
      ds = max(abs(H));
      fp2 = ft2:(Fs/2-ft2)/1000:Fs/2;
      \mathbf{H} = \text{freqz}(b,a,\text{fp2},\text{Fs});
      dp2 = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
      Внешняя функция plot fir, предназначенная для вывода графиков ИХ,
АЧХ и
      ФЧХКИХ-фильтра:
      function plot fir(R,b,Fs)
      % Вывод графиков ИХ, АЧХ и ФЧХ КИХ-фильтра
      %
      % R — порядок КИХ-фильтра
      % b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра (ИХ КИХ-фильтра)
      % Fs — частота дискретизации (Гц)
```

%

% а = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции % п — вектор дискретного нормированного времени % f — сетка частот (Гц) для расчета АЧХ и ФЧХ % Н — частотная характеристика % MAG и PHASE — АЧХ и ФЧХ % a = [1];n = 0:R;subplot(3,1,1), stem(n,b,'fill','MarkerSize',3) xlabel('n'), title('Impulse Response'), grid f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2;H = freqz(b,a,f,Fs);MAG = abs(H);**PHASE** = angle(H); subplot(3,1,2), plot(f,MAG) xlabel('f (Hz)'), title('MAGNITUDE'), grid subplot(3,1,3), plot(f,PHASE) xlabel('f (Hz)'), title('PHASE'), grid

11.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании functionфайлов для синтеза КИХ-фильтра ФНЧ методом окон с применением окна Кайзера, анализа его характеристик и моделирования процесса цифровой фильтрации.

Пункты самостоятельного задания включает в себя:

1С. Синтез КИХ-фильтра ФНЧ с произвольными требованиями к АЧХ (входные параметры function-файла).

Для проверки выполнения требований к АЧХ использовать function-файл check_low (см. разд. 11.4.5), который хранится на диске в папке LAB_DSP\LAB_11.

Вывести графики ИХ, АЧХ и ФЧХ с помощью function-файла plot_fir

(см. разд. 11.4.5), который хранится на диске в папке LAB_DSP\LAB_11.

Выходным параметром function-файла является вектор коэффициентов КИХфильтра.

2С. Вычисление реакции КИХ-фильтра ФНЧ на воздействие в виде периодической последовательности с периодом N=64 :

$$x(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_{\mathrm{A}}}n\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_{\mathrm{A}}}n\right) = A_1 \cos(\widehat{\omega}_1 n) + A_2 \cos(\widehat{\omega}_2 n)$$

Входными параметрами function-файла являются:

вектор коэффициентов КИХ-фильтра (см. п. 1С);

• частота дискретизации f_{d} (она должна совпадать с заданной в требованиях к АЧХ КИХ-фильта);

- амплитуды гармоникА₁ и А₂;
- частоты гармоник f₁ и f₂.

Вводимые значения частот должны быть согласованы с граничными частотами в требованиях к АЧХ КИХ-фильтра. Частота f_1 должна быть расположена в ПП, а частота f_2 — в ПЗ. При этом отсутствие растекания спектра (см. п. 3С) гарантируется в том случае, если для частот f_1 и f_2 отношение (10.1) будет целым числом.

Реакцию КИХ-фильтра у (n) вычислить с помощью функции filter.

Вывести графики воздействия и реакции КИХ-фильтра.

Выходными параметрами function-файла являются векторы отсчетов воздействия и реакции.

3С. Вычисление амплитудных спектров воздействия и реакции КИХфильтра ФНЧ.

Входными параметрами function-файла являются векторы отсчетов воздействия и реакции КИХ-фильтра.

Для вычисления амплитудных спектров воздействия и реакции использовать функцию fft.

Вывести графики амплитудных спектров.

11.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения пунктов задания, включая заполненную табл. 11.7, созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure), описания структур КИХ-фильтров в виде объектов dfilt, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

- 1. Дайте определение цифрового фильтра.
- 2. Перечислите основные этапы проектирования цифрового фильтра.
- 3. Запишите передаточную функцию КИХ-фильтра.
- 4. Дайте определение длины и порядка КИХ-фильтра.
- 5. Назовите основные особенности КИХ-фильтров.

6. При каком условии КИХ-фильтр будет иметь строго линейную ФЧХ?

7. В каких точках ФЧХ фильтра имеет скачок на π ?

8. Назовите признаки, по которым различают четыре типа КИХфильтров с ЛФЧХ.

9. Какие типы КИХ-фильтров с ЛФЧХ могут использоваться для синтеза фильтра методом окон?

- 10. Что входит в требования к АЧХ КИХ-фильтра?
- 11. Назовите основные свойства АЧХ и ФЧХ.
- 12. Что отображает структура ЦФ и чем определяется ее вид?
- 13. Назовите основные структуры КИХ-фильтров.

14. Перечислите основные этапы итерационной процедуры синтеза КИХ-фильтров методом окон.

- 15. Дайте определения окна и частоты разрыва.
- 16. Какой вид имеет АЧХ при синтезе КИХ-фильтров методом окон?
- 17. Назовите основное преимущество и недостаток метода око

Лабораторная работа №6 Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования

Цель работы: изучить процедуру синтеза БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования и овладеть программными средствами MATLAB для синтеза и анализа БИХ-фильтров; познакомиться с GUI FVTool (Filter Visualization Tool — средство визуализации фильтра).

13.1. Краткая теоретическая справка

БИХ-фильтр описывается передаточной функцией общего вида (8.4):

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}}$$
(13.1)

и при (N–1) \leq (M–1) (по умолчанию) имеет порядок R , равный R = (M –1).

БИХ-фильтры характеризируются следующими особенностями: %нелинейной ФЧХ;

%необходимостью проверки на устойчивость.

Оптимальным называют БИХ-фильтр минимального порядка R при заданных требованиях к АЧХ.

13.1.1. Задание требований к характеристике затухания

Для БИХ-фильтров требования задаются к характеристике затухания АЧХ (дБ) (11.6) в основной полосе частот[0; f_д/2] и включают в себя:

частоту дискретизации f_{π} (Гц);

граничные частоты полос пропускания (ПП) и полос задерживания (ПЗ), такие же, как для КИХ-фильтров *(см. разд. 11.1.2):*

- f_{χ} граничная частота ПП для ФНЧ и ФВЧ;
- f_k граничная частота ПЗ для ФНЧ и ФВЧ;
- $f_{-\chi}, f_{\chi}$ левая и правая граничные частоты ПП для ПФ и РФ;

• f_{-k} , f_k — левая и правая граничные частоты ПЗ для ПФ и РФ;

 \mathfrak{G} допустимые отклонения от $\hat{A}(f)$ (дБ) (11.6) (см. разд. 11.1.2):

• a_{max} (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП (для ФНЧ, ФВЧ и ПФ);

• a_{min} (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ (для ФНЧ, ФВЧ и РФ);

• a_{1 max} (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП1 (для РФ);

- $a_{2 \max}$ (дБ) максимально допустимое затухание в ПП2 (для РФ);
- а_{1 min} (дБ) минимально допустимое затухание в ПЗ1 (для ПФ);
- $a_{2 \min} (дБ)$ минимально допустимое затухание в ПЗ2 (для ПФ).

13.1.2. Структуры БИХ-фильтров

Структура (структурная схема) ЦФ отображает алгоритм вычисления реакции по разностному уравнению и определяется видом передаточной функции.

В MATLAB структура БИХ-фильтра описывается в виде объекта dfilt:

Hd = dfilt.structure(input1,input2)

где Hd — имя объекта dfilt; dfilt — тип объекта; structure — функция, задающая конкретную структуру объекта Hd (табл. 13.1); input1, input2 — параметры функции structure.

Для БИХ-фильтров свойства объекта dfilt с именем Hd зависят от выбранной структуры. Для прямой структуры БИХ-фильтра они включают в себя:

SArithmetic — форма представления данных;

SNumerator — коэффициенты числителя передаточной функции (12.1);

Spenominator — коэффициенты знаменателя передаточной функции (12.1);

SPersistentMemory — начальные условия при вычислении реакции; значение false соответствует ННУ (см. разд. 8.1).

Каскадной структуре из биквадратных звеньев соответствует представление передаточной функции в виде произведения (8.9):

$$H(z) = G \prod_{k=1}^{L} \frac{1 + b_{1k} z^{-1} + b_{2k} z^{-2}}{1 + a_{1k} z^{-1} + a_{2k} z^{-2}}$$
(13.2)

где звенья имеют одну из прямых структур, представленных на рис. 8.1.

В каскадной структуре БИХ-фильтра свойства Numerator и Denominator заменяются свойствами:

SosMatrix — матрица коэффициентов в виде (8.12):

ScaleValues — вектор коэффициентов усиления, элементы которого равны:

• первый — коэффициенту усиления на входе первого звена, т. е. на входеструктуры;

второй — коэффициенту усиления на входе второго звена и т. д.;

• последний — коэффициенту усиления на выходе последнего звена, т. е. на *выходе структуры*.

Таблица 13.1. Функции structure и структуры БИХ-фильтров

Функция structure	Параметры функцииstructure	Структура БИХ-фильтра	
df1 df1t	b, а — векторы коэффициентов передаточной функции (13.1)	Direct-Form I (прямая) Direct-Form I Transposed (прямаятранспонированная)	
df2		Direct-Form II	

		(прямая каноническая)	
df2t		Direct-Form II Transposed (прямая каноническая транспонированная)	
df1sos	s — матрица коэффициентов в виде (13.3);	Direct-Form I, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой структурой)	
df1tsos	G — коэффициент усиления передаточной функции (13.2)	Direct-Form I Transposed, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой транспонированной структурой)	
df2sos		Direct-form II, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой канонической структурой)	

13.1.3. Процедура синтеза БИХ-фильтров методом билинейного Zпреобразования

Синтез БИХ-фильтра заключается в расчете его передаточной функции.

Метод билинейного Z-преобразования, позволяющий синтезировать оптимальный БИХ-фильтр, основан на использовании аналогового фильтра-прототипа (АФП)¹.

Процедура синтеза БИХ-фильтра на основе АФП включает в себя следующие шаги:

1. Задание требований к характеристике затухания АЧХ (дБ) (11.6) БИХ-фильтра.

2. Формирование требований к АЧХ (дБ) АФП.

Граничные частоты АФП Ω связаны с граничными частотами БИХфильтра ω нелинейной зависимостью:

$$\Omega = \frac{2}{T} tg \frac{\omega T}{2}$$

которая в шкале частот в герцах соответствует зависимости между частотами АФП F и БИХ-фильтра *f* :

$$F = \frac{f_{\rm A}}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi f}{f_{\rm A}}$$
 13.4)

(

3. Выбор типа БИХ-фильтра.

Подобно АФП, четырем видам аппроксимирующих функций соответствуют четыре типа БИХ-фильтров:

¹ С теоретическими основами метода билинейного Z-преобразования можно познакомиться в [2, 3].

%Чебышева I рода (Chebyshev Type I) — с АЧХ, равноволновой в ПП и монотонной в ПЗ;

%Чебышева II рода (Chebyshev Type II) — с АЧХ, максимально плоской в ПП и равноволновой в ПЗ;

4. Расчет передаточной функции АФП H_a(p).

5. Преобразование передаточной функции АФП H_a(p) в передаточную функцию БИХ-фильтра H(z) на основе формулы билинейного Z-преобразования:

$$p = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

6. Выбор структуры БИХ-фильтра.

13.1.4. Синтез аналоговых фильтров в МАТLAВ

Синтез частотно-избирательных аналоговых фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра выполняется соответственно с помощью функций:

[bs,as] = butter(Ra,Wn,ftype,'s')

[bs,as] = cheby1(Ra,rp,Wn,ftype,'s')

[bs,as] = cheby2(Ra,rs,Wn,ftype,'s')

[bs,as] = ellip(Ra,rp,rs,Wn,ftype,'s')

гдеRа — порядоканалоговогофильтра; Wn — вектор*частот* срезавшкале $\omega = 2\pi f$ (рад/с), содержащийодинэлемент — для ФНЧ и ФВЧ и два — для ПФ и РФ; частотамисрезаназываютчастоты, накоторыхнормированная АЧХ $\hat{A}(f)$ равна $1/\sqrt{2} \approx 0,707$, а затухание $\hat{A}(f)$ (дБ) — 3 дБ; гр, гs — максимально и минимально

допустимые затухания а_{max} (дБ) в ПП и а_{min} (дБ) в ПЗ для характеристики затухания АЧХ (дБ) (11.6).

Для аналогового ПФ, синтезируемого с помощью данных функций, минимально допустимые отклонения в ПЗ1 и ПЗ2 задаются одинаковыми. Аналогично, для РФ максимально допустимые отклонения в ПП1 и ПП2 задаются одинаковыми. ftype — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

%ј'high' — для ФВЧ;

%;'stop' — для РФ;

\$По умолчанию (если параметр отсутствует) — для ФНЧ или ПФ.

's' — признак аналогового фильтра; при его отсутствии по умолчанию подразумевается ЦФ; bs, as — векторы коэффициентов числителя и

знаменателя передаточной функции аналогового фильтра $H_a(p)$ в порядке возрастания степеней p; as(1) = 1.

Порядок аналогового фильтра (Ra) и частоты среза (Wn) определяются по требованиям к АЧХ (дБ) (11.6) с помощью следующих функций, соответственно для АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева— Кауэра:

[Ra,Wn] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s')

[Ra,Wn] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s')

[Ra,Wn] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s')

[Ra,Wn] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s')

гдеWp, Ws —

векторыграничных частот ППиПЗвпорядкеследования слевана правовшкалечасто т $\omega = \pi 2 f (pag/c)$.

13.1.5. Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования в МАТLAB

Для синтеза БИХ-фильтра методом билинейного Z-преобразования используются те же функции, что и для синтеза аналоговых фильтров, но без параметра 's':

[b,a] = butter(R,WDn,ftype)

[b,a] = cheby1(R,rp,WDn,ftype)

[b,a] = cheby2(R,rs,WDn,ftype)

[b,a] = ellip(R,rp,rs,WDn,ftype)

где R — порядок БИХ-фильтра; WDn — вектор нормированных частот среза (см. разд .13.1.4) в шкале нормированных частот $\hat{f} = \frac{f}{f/2}$:

‰для ФНЧ и ФВЧ с одним элементом WDn(1), равным

$$\hat{f}_0 = \frac{f_0}{f_{\rm A}/2}$$

где f_0 — абсолютная частота среза (Гц);

\$%для ПФ и РФ с двумя элементами WDn(1) и WDn(2), соответственно равными:

$$\hat{f}_{01} = \frac{f_{01}}{f_{\pi}/2}$$
$$\hat{f}_{02} = \frac{f_{02}}{f_{\pi}/2}$$

где f_{01} , f_{02} — абсолютные частоты среза (Гц). rp, rs — максимально и минимально допустимые затухания a_{max} (дБ) в ПП и

а_{тіп} (дБ) в ПЗ для характеристики затухания АЧХ (дБ) (11.6).

Для ПФ, синтезируемого с помощью данных функций, минимально допустимые отклонения в ПЗ1 и ПЗ2 задаются одинаковыми. Аналогично, для РФ максимально допустимые отклонения в ПП1 и ПП2 задаются одинаковыми. Однако при синтезе БИХ-фильтра в виде объекта dfilt на основе объекта fdesign

(см. разд. 12.1.3) данные ограничения снимаются. ftype — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

%;'high' — для ФВЧ;

%;stop' — для РФ;

\$\$по умолчанию (если параметр отсутствует) — для ФНЧ и ПФ.

b, а — векторы коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции БИХ-фильтра H()z (13.1) в порядке возрастания отрицательных степеней z;

a(1)=1.

Порядок (R) и частоты среза (WDn) БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра определяются по требованиям к АЧХ (дБ) (11.6) с помощью тех же функций, что и для аналогового фильтра (см. разд. 13.1.4), но без пара- метра 's':

[R,WDn] = buttord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs)

где WDp, WDs — соответственно векторы граничных нормированных частот ПП и ПЗ в порядке их следования слева направо в шкале нормированных частот $\hat{f} = \frac{f}{f_{\pi}/2}$

При синтезе БИХ-фильтров сохраняется свойство оптимальности АФП — ЦФ будет также оптимальным.

13.1.6. Синтез БИХ-фильтров в виде объектов dfilt на основе объектов fdesign

При задании требований к характеристике затухания АЧХ (дБ) (11.6) в виде объекта fdesign(*см. разд. 12.1.3*) для синтеза БИХ-фильтра *методом билинейного Z-преобразования* используются функции, представленные в табл. 13.2. В этом случае для ПФ и РФ соответственно минимально допустимые затухания в ПЗ1 и ПЗ2 и максимально допустимые затухания в ПП1 и ПП2 могут задаваться неодинаковыми.

Функция	Тип БИХ-фильтра
butter	Фильтр Баттерворта (Butterworth filter)
cheby1	ФильтрЧебышеваІрода (ChebyshevTypeIfilter)
cheby2	Фильтр Чебышева II рода (Chebyshev Type II filter)
ellip	Фильтр Золотарева—Кауэра (Elliptic filter — эллиптический)

Таблица 13.2. Функции синтеза БИХ-фильтра в виде объекта dfilt

Обобщенный формат функции синтеза БИХ-фильтра в виде объекта dfilt на основе объекта fdesign представлен двумя разновидностями:

Hf_=_function_iir(Hs,'MatchExactly',MATCH,'FilterStructure','structure')

Hf_=_design(Hs,'function_iir','MatchExactly',MATCH,'FilterStructure', 'structure')

где function_iir — имя конкретной функции из табл. 13.2; Hs — имя объекта fdesign; 'MatchExactly' — параметр (флаг), установка которого (присутствие в составе параметров) означает, что требования к АЧХ (дБ) должны выполняться точно; МАТСН — параметр, уточняющий, в какой из полос требования должны выполняться точно, и принимающий значения:

\$stopband' (по умолчанию) — в полосах задерживания;

%'both' — в полосах задерживания и пропускания (только для функции ellip).

'FilterStructure' — параметр (флаг), установка которого (присутствие в составе параметров) означает, что для БИХ-фильтра будет указана структура;

'structure' — функция, задающая конкретную структуру объекта Hf

(см. табл. 13.1); Hf — имя объекта dfilt.

Для расчета ЧХ и ИХ БИХ-фильтра в виде объекта dfilt используются функции freqz и impz (см. разд. 12.1.4).

13.1.7. Расстановка звеньев и масштабирование в каскадных структурах БИХ-фильтров

Перед моделированием каскадной структуры БИХ-фильтра с фиксированной точкой (ФТ), о чем пойдет речь в гл. 15, необходимо предусмотреть выполнение двух операций [1]:

\$\$ формирование и расстановка звеньев.

Звенья в (13.2) формируются посредством объединения полюсов с ближайшими нулями, после чего они расставляются в порядке возрастания радиусов полюсов. Это позволяет минимизировать собственные шумы, обусловленные умножителями. При описании каскадной структуры БИХ-фильтров в виде объекта dfilt формирование и расстановка звеньев осуществляются автоматически;

Semacштабирование.

Для минимизации переполнений на выходах сумматоров на входах звеньев добавляются масштабирующие множители, которые учитываются в числителях передаточных функций звеньев.

В MATLAB эта операция реализуется с помощью функции:

scale(Hf,norm)

где Hf — имя объекта dfilt с каскадной структурой из звеньев 2-го порядка; norm — вводимое в апострофах имя нормы, на основе которой рассчитываются масштабирующие множители: 'L1' — для нормы $||\mathbf{x}||_1$ (2.4), 'Linf' — для нормы $||\mathbf{x}||_{\infty}$ (2.6) и 'L2' — для нормы $||\mathbf{x}||_2$ (2.8), которое выбирается по умолчанию в отсутствии параметра norm.

13.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с синтезом БИХ-фильтров методом билинейного

Z-преобразования, описанием их структур и анализом характеристик с использованием программных средств MATLAB.

13.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файлов lr_13_low, lr_13_high,

lr_13_pass и lr_13_stop и function-файла plot_iir, которые хранятся на прилагае-

мом компакт-диске в папке LAB_DSP\LAB_13.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_13 по команде

контекстногоменюAdd to Path | Selected Folders.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 13.3—13.6 для номера

бригады $N_{\text{бр}}$, где $N_{\text{бр}}$ = 1, 2, ... , 30 , и включают в себя требования к характеристике

затухания АЧХ (дБ) (11.6) БИХ-фильтров ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ. Значения допус-

тимых затуханий рассчитаны по формулам (11.7)—(11.8).

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\Tables_13 хранятся табл. 13.3—13.6

исходных данных, примеры их заполнения для бр

N =1 и табл. 13.7 для п. 4 задания.

Таблица 13.3. Требования к АЧХ (дБ) ФНЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
$f_{\scriptscriptstyle m I\!I}$	Частота дискретизации	<i>f</i> д =5000+100 Nбр	Fs =
f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_x = \frac{f_{\rm A}}{10} + 20N_{\rm 6p}$	ft =
f _к	Граничная частота ПЗ	$f_k = \frac{f_{\rm A}}{10} + 250 + 25N_{\rm 6p}$	fk =
a _{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{maz} = 0, 4455$	rp = 0.4455

a min	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{\min} = 40$	rs = 40
Таблица 13.4	Требования к А	ΙХ (дБ) ФВЧ	
Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
fд	Частота дискретизации	<i>f</i> д =5000 100+ Nбр	Fs =
fк	Граничная частота ПЗ	$f_k = \frac{f_{\rm A}}{10} + 20N_{\rm 6p}$	fk =
f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_k = \frac{f_{\rm A}}{10} + 250 + 25N_{\rm 6p}$	ft =
a _{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{\min} = 40$	$r_s = 40$
a _{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{max} = 0,4455$	rp = 0.4455

Таблица 13.5. Требования к АЧХ (дБ) ПФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
$f_{{\scriptscriptstyle m I\!I}}$	Частота дискретизации	<i>f</i> д =5000+100 Nбр	Fs =
<i>f</i> −k	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\mathrm{A}}}{20} + 20N_{\mathrm{6p}}$	fk1 =
f_{χ}	Граничная частота ПП1	$f_{-x} = \frac{f_{\rm A}}{20} + 250 + 25N_{\rm \delta p}$	ft1 =
f_{χ}	Граничная частота ПП2	$f_x = \frac{f_{\rm A}}{4} + 25N_{\rm 6p}$	ft2 =

$f_{ m k}$	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_{\rm A}}{4} + 250 + 30N_{\rm 6p}$	fk2 =
a _{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{max} = 0,4455$	rp = 0.4455
a _{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ1 и ПЗ2 (дБ)	$a_{min} = 40$	rs = 40

Таблица 13.6. Требования к АЧХ (дБ) РФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
$f_{{\scriptscriptstyle m I\!I}}$	Частота дискретизации	fд =5000+100 Nбр	Fs =
$f_{-\chi}$	Граничная частота ПП1	$f_{-x} = \frac{f_{\mathrm{A}}}{20} + 20N_{\mathrm{6p}}$	ft1 =
<i>f</i> –k	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\rm A}}{20} + 250 + 25N_{\rm 6p}$	fk1 =
ſĸ	Граничная частота П32	$f_k = \frac{f_{\rm A}}{4} + 25N_{\rm 6p}$	fk2 =
f_{χ}	Граничная частота ПП2	$f_x = \frac{f_{\rm A}}{4} + 250 + 30N_{\rm 6p}$	ft2 =
a _{max}	Максимально допустимое затухание в ПП1 и ПП2 (дБ)	a _{max} = 0,4455	rp = 0.4455
a _{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{\min} = 40$	rs = 40

Задание на лабораторную работу заключается в синтезе БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования и анализе их характеристик и для каждого типаизбирательности (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) включает в себя выполнение следующих пунктов:

1. Ввод требований к характеристике затухания БИХ-фильтра.

2. Синтез БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра, выполняемый в два этапа:

вычисление порядков и частот среза БИХ-фильтров;

синтез БИХ-фильтров.

Выведенные значения порядков БИХ-фильтров записать в табл. 13.7. Пояснить:

• какая функция используется для вычисления порядка и частот среза;

• какие функции используются для синтеза БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра;

• какие из параметров данных функции соответствуют коэффициентам передаточной функции БИХ-фильтра;

какой из БИХ-фильтров имеет минимальный порядок.

	Тип и порядок БИХ-фильтра			
Тип избирательности фильтра	Батте рворта	Чеб ышева І рода	Чеб ышева Ш рода	Золота рева— Кауэра
	R1	R2	R3	R4
ФНЧ				
ФВЧ				
ΠΦ				
РФ				

Таблица 13.7. Результаты синтеза БИХ-фильтров и АФП

3. Анализ характеристик БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра.

Для вывода графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ (50 отсчетов) и карты нулей и полюсов БИХ-фильтров использовать function-файл plot_iir (см. разд. 13.4.5).

Пояснить:

⊛вид ИХ;

4. Синтез АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева— Кауэра, выполняемый в три этапа:

• формирование требований к характеристике затухания АФП с выводом граничных частот ПП и ПЗ;

вычисление порядка и частот среза АФП;

• синтез АФП.

Пояснить:

- соответствие между граничными частотами АФП и БИХ-фильтра;
- соответствие между порядками АФП и БИХ-фильтров.

5. Вывод графиков АЧХ АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева— Кауэра.

Вывести графики АЧХ АФП в основной полосе частот $[0; f_{\pi}/2]$, вычисленные с помощью функции freqs.

Сделать вывод по результатам сравнения АЧХ АФП и БИХ-фильтров.

6. Описание требований к АЧХ БИХ-фильтра в виде объектаfdesign.

Описать требования к характеристике затухания в виде объектов fdesign с именами:

• MAG_lowpass — Φ HЧ;

- MAG_highpass $\Phi B \Psi$;
- MAG_bandpass $\Pi \Phi$;
- MAG_bandstop $P\Phi$.

Пояснить, что в себя включает список свойства объекта fdesign и с какой целью он создается.

7. Синтез БИХ-фильтра Золотарева—Кауэра в виде объекта dfilt на основе объекта fdesign.

Синтезировать БИХ-фильтры с прямой канонической структурой звеньев (см. табл. 13.1) в виде объектов dfilt со следующими именами:

- F lowpass Φ HY;
- \overline{F} highpass $\Phi B \Psi$;
- F bandpass $\Pi \Phi$;
- \overline{F} bandstop $P\Phi$.

Пояснить:

%что в себя включает список свойств объекта dfilt;

%совпадает ли порядок синтезированного БИХ-фильтра с порядком в табл. 13.7.

8. Масштабирование в каскадной структуре БИХ-фильтра Золотарева—Кауэра.

Выполнить масштабирование на основе нормы 'Linf' (по умолчанию) для объектов F_lowpass и F_bandpass и на основе нормы 'L2' для объектов F_highpass и F_bandstop.

Сохранить новые объекты dfilt с именами:

- F lowpass scale Φ HY;
- F_highpass_scale ΦΒΨ;
- F_bandpass_scale $\Pi \Phi$;
- F bandstop scale $P\Phi$.

Пояснить, какие свойства объекта dfilt изменились после масштабирования.

9. Знакомство с GUI FVTool.

Обратиться к GUI FVTool по команде: fvtool(Hd)

где Hd — имя объекта dfilt, и проанализировать характеристики синтезированных БИХ-фильтров.

13.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должны быть представлены табл. 13.3—13.6 исходных данных для своего номера бригады N_{бр}.

Для четырех типов избирательности БИХ-фильтра — ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ — предусмотрены четыре script-файла. Для запуска script-файла к нему необходимо обратиться по имени:

>>lr_13_low— ФНЧ

>>lr_13_high— Φ BY

> lr_13_pass — ПФ

>> lr 13 stop — P Φ

Листинги данных script-файлов представлены в разд. 13.4.1—13.4.4.

Для принудительного снятия script-файла с выполнения следует нажать комбина-

цию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками не закрывать.

13.4.1. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФНЧ

Листинг script-файлаlr_13_lowимеет вид:

>> type lr_13_low Script

clc

```
сис
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('%')
disp('%')
disp('%')
disp('%')
disp('%')
введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
```

```
<u>% НОМЕРБРИГАДЫ</u>
Nb = input('Nb = ');
Fs = input('Fs = ');% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
\mathbf{ft} = \text{input}(\text{'ft} = \text{'}); \% \Gamma PAHUYHAЯ ЧАСТОТА ПП (Гц))
\mathbf{fk} = input('fk = '); \% \Gamma PAHИЧHAЯ ЧACTOTA ПЗ (Гц)
rp = input('rp = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП
rs = input('rs = '); % МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПЗ
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И
ІІ РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('\%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ФНЧ нажмите <ENTER>')
pause
WDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ГРАНИЧНЫЕ НОРМИРОВАННЫЕ
ЧАСТОТЫ ПП и ПЗ
[R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-
ФИЛЬТРА ФНЧ
БАТТЕРВОРТА
[R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА
ЧЕБЫШЕВА І РОДА
[R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[R4,WDn4] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-
ФИЛЬТРА ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[b1,a1] = butter(R1,WDn1); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
БАТТЕРВОРТА
[b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА
```

І РОДА [b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ФНЧ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),' R4 = 'num2str(R4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')disp('% п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФНЧ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФНЧ (ЧЕТЫРЕ ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА) нажмите<ENTER>') pause figure('Name','Lowpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle', 'off') plot iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ БАТТЕРВОРТА figure('Name','Lowpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle', 'off') plot iir(b2,a2,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЧЕБЫШЕВА II РОЛА figure('Name','Lowpass IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle', 'off') plot iir(b3,a3,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЧЕБЫШЕВА **П РОДА** figure('Name','Lowpass IIR Filter Elliptic','NumberTitle', 'off') plot iir(b4,a4,Fs) <u>% ХАРА</u>КТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause

disp('%') disp('%') disp('% п.4. СИНТЕЗ АПФ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И ІІ РОДА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода граничных частот АФП ФНЧ ПП (Ft) и ПЗ (Fk) нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); %ГРАНИЧНЫЕЧАСТОТЫПП иПЗАФП disp(['Ft = 'num2str(Ft), 'Fk = 'num2str(Fk)])disp('%')disp('%') disp('% ДлясинтезаАФПФНЧнажмите<ENTER>') pause **Wp** = 2.*pi.*Ft; **Ws** = 2.*pi.*Fk; % ГРАНИЧНЫЕ КРУГОВЫЕ ЧАСТОТЫ ПП и Π3 ΑΦΠ [Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП ФНЧ БАТТЕРВОРТА [Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); <u>% ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП</u> ФНЧ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФПФНЧ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФПФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФНЧБАТТЕРВОРТА [bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФНЧЧЕБЫШЕВА І РОЛА [bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФНЧЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА [bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФНЧЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%')

disp('% Для вывода порядков АФП ФНЧ нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp(['Ra1 = 'num2str(Ra1), 'Ra2 = 'num2str(Ra2), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3),num2str(Ra3), Ra4 = 'num2str(Ra4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И II РОДА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>') pause **f** = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ W = 2.*pi.*f;Ha1 = freqs(bs1,as1,W); MAG1 = abs(Ha1); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ БАТТЕРВОРТА Ha2 = freqs(bs2,as2,W); MAG2 = abs(Ha2); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧЧЕБЫШЕВА ІРОЛА Ha3 = freqs(bs3,as3,W); MAG3 = abs(Ha3); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА Ha4 = freqs(bs4,as4,W); MAG4 = abs(Ha4); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА figure('Name','Lowpass Analog Filter — Magnitude','NumberTitle', 'off') subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,4),plot(f, abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2]) disp('%') disp('%') disp('% Дляпродолжениянажмите<ENTER>') pause disp('%')
```
disp('%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ
ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG lowpass = fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap,Ast',ft,fk,rp,rs,[Fs]) % ObbEKT
fdesign ДЛЯ ФНЧ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В
ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F lowpass = design(MAG lowpass,'ellip','MatchExactly',
'both','FilterStructure','df2sos') % ФНЧ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-
ФИЛЬТРА ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования
нажмите
<ENTER>')
pause
F lowpass scale = scale(F lowpass) % РЕЗУЛЬТАТ МАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
```

disp('%')

disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗАВЕРШЕН')

```
13.4.2. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФВЧ
     Листинг script-файла lr 13 high имеет вид:
     >> type lr 13 high
script
clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) ФВЧ')
disp('%')
disp('\%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
\mathbf{fk} = \text{input}(\text{'fk} = \text{'}); \% \Gamma PAHUYHAЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц))
\mathbf{ft} = \text{input}(\text{'ft} = \text{'}); \% \Gamma PAHUYHAЯ ЧАСТОТА ПП (Гц))
rs = input('rs = '); % МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПЗ
rp = input('rp = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('\%')
disp('\%')
disp('% п.2. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И
П РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ФВЧ нажмите <ENTER>')
pause
```

WDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ГРАНИЧНЫЕ НОРМИРОВАННЫЕЧАСТОТЫ ПП и ПЗ [**R1,WDn1**] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ БАТТЕРВОРТА [R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [**R4,WDn4**] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [b1,a1] = butter(R1,WDn1,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧБАТТЕРВОРТА [b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРАФВЧ ЧЕБЫШЕВА **І РОДА** [b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРАФВЧ ЧЕБЬ<u>ІШЕВА</u> **П РОДА** [b4,a4] = cheby2(R4,rs,WDn4,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРАФВЧ ЧЕБЫШЕВА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%')disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ФВЧ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['R1 = 'num2str(R1), 'R2 = 'num2str(R2), 'R3 = 'num2str(R3), 'R4 = 'num2str(R4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФВЧ') disp('%') disp('%')

disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФВЧ (ЧЕТЫРЕ ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА) нажмите<ENTER>') pause figure('Name','Highpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle', 'off') plot iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ **<u>БАТТЕ</u>РВОРТА** figure('Name','Highpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle', 'off') plot iir(b2,a2,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА II РОДА figure('Name','HighpassIIR Filter Chebyshov II','NumberTitle', 'off') plot iir(b3,a3,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА II РОЛА figure('Name','Highpass IIR Filter Elliptic','NumberTitle', 'off') plot iir(b4,a4,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И ІІ РОДА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода граничных частот АФП ФВЧ ПЗ (Fk) и ПП (Ft) нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); %ГРАНИЧНЫЕЧАСТОТЫПП иПЗАФП disp(['Fk = 'num2str(Fk), 'Ft = 'num2str(Ft)])disp('%') disp('%') disp('% ДлясинтезаАФПФВЧнажмите<ENTER>') pause **Wp** = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk; % ГРАНИЧНЫЕ КРУГОВЫЕ ЧАСТОТЫ ПП и Π3 ΑΦΠ [Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП ΦВЧ

БАТТЕРВОРТА [Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); <u>% ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП</u> ΦВЧ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФПΦВЧ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФПΦВЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [bs1.as1] = butter(Ra1, Wn1, 'high', 's'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧБАТТЕРВОРТА [bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧЧЕБЫШЕВА **І РОДА** [bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧЧЕБЫШЕВА **П РОДА** [bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧЧЕБЫШЕВА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%')disp('%') disp('% Для вывода порядков АФП ФВЧ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['Ra1 = 'num2str(Ra1), 'Ra2 = 'num2str(Ra2), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3),num2str(Ra3), Ra4 = 'num2str(Ra4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА **І И ІІ РОДА** И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>') pause **f** = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ

```
W = 2.*pi.*f;
Ha1 = freqs(bs1,as1,W); % \Psi X A \Phi \Pi F F B O P T A
Ha2 = freqs(bs2,as2,W); % ЧХАФПЧЕБЫШЕВА I РОДА
Ha3 = freqs(bs3,as3,W); % ЧХАФПЧЕБЫШЕВА II РОДА
Ha4 = freqs(bs4,as4,W); % ЧХАФПЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
figure('Name', 'Highpass Analog Filter — Magnitude', 'NumberTitle', 'off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Дляпродолжениянажмите<ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ
Obbekta fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG highpass= fdesign.highpass('Fst,Fp,Ast,Ap',fk,ft,rs,rp,[Fs]) % OF5EKT
fdesign ДЛЯФВЧ
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В
ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F highpass = design(MAG highpass,'ellip','MatchExactly',
'both','FilterStructure','df2sos')
                               % ФВЧВВИДЕОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
```

```
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-
ФИЛЬТРА ФВЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования
нажмите
<ENTER>')
pause
F highpass scale = scale(F highpass,'L2') \frac{\%}{2}
РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗАВЕРШЕН')
```

```
13.4.3. Синтез и анализ БИХ-фильтра ПФ
```

Листинг script-файла lr 13 pass имеет вид:

```
>> type lr 13 pass
script
clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) ПФ')
disp('%')
disp('\%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = ');
                         % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = ');% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
\mathbf{fk1} = \text{input}(\mathbf{fk1} = \mathbf{'}); \% \Gamma PAHUYHAЯ ЧАСТОТА ПЗ1 (Гц))
ft1 = input('ft1 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 (\Gammaц)
ft2 = input('ft2 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц)
\mathbf{fk2} = input('fk2 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц))
```

rp = input('rp = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП rs = input('rs = ');% МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПЗ disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ') disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1') disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод') DATA = input('-->');end disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.2. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И **ІІ РОДА** И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ПФ нажмите <ENTER>') pause ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗWDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХНОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ [R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ПФ БАТТЕРВОРТА [R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [R3.WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОР<u>ЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА</u> БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [**R4,WDn4**] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [b1,a1] = butter(R1,WDn1);% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ БАТТЕРВОРТА [b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА **І РОДА**

[b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ПФ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),' R4 = 'num2str(R4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ПФ') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ПФ (ЧЕТЫРЕ ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА) нажмите<ENTER>') pause figure('Name','Bandpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle', 'off') plot iir(b1,a1,Fs) <u>% ХАРАКТ</u>ЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ БАТТЕРВОРТА figure('Name','Bandpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle', 'off') plot iir(b2,a2,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА II РОЛА figure('Name','Bandpass IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle', 'off') plot iir(b3,a3,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА figure('Name', 'Bandpass IIR Filter Elliptic', 'NumberTitle', 'off') plot iir(b4.a4.Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')

disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И ІІ РОДА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода граничных частот АФП ПФ ПЗ1 (Fk1), ПП1 (Ft1), ПП2 (Ft2) и П32 (Fk2) нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗБИХ-ФИЛЬТРА Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); % BEKTOPЫ ГРАНИЧНЫХЧАСТОТ ПП и ПЗ АФП disp(['Fk1 = 'num2str(Fk(1)), 'Ft1 = 'num2str(Ft(1)), 'Ft2 = 'num2str(Ft(1))num2str(Ft(2)), Fk2 = 'num2str(Fk(2))]) disp('%')disp('%') disp('% Для синтеза АФП ПФ нажмите <ENTER>') pause **Wp** = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ КРУГОВЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ АФП [Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП ΠФ БАТТЕРВОРТА [Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФППФ ЧЕБЫШЕВА **І РОДА** [Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФППФ ЧЕБЫШЕВА **П РОДА** [Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП ΠФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'s'); <u>% КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФ БАТТЕРВОРТА</u> [bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФЧЕБЫШЕВА І РОЛА [bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА [bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%')

disp('% Для вывода порядков АФП ПФ нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp(['Ra1 = 'num2str(Ra1), 'Ra2 = 'num2str(Ra2), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3),num2str(Ra3), Ra4 = 'num2str(Ra4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА **І И ІІ РОДА** И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%')disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>') pause **f**= 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ W = 2.*pi.*f;Ha1 = freqs(bs1,as1,W); % $4X A\Phi\Pi FATTEPBOPTA$ % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА І РОДА Ha2 = freqs(bs2,as2,W);Ha3 = freqs(bs3,as3,W);% ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА Ha4 = freqs(bs4,as4,W);% ЧХ АФП ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА figure('Name', 'Bandpass Analog Filter — Magnitude', 'NumberTitle', 'off') subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2]) subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,... ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2]) disp('%') disp('%') disp('% Дляпродолжениянажмите<ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ **ОБЪЕКТА** fdesign') disp('%')

disp('%') disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>') pause MAG bandpass = fdesign.bandpass('Fst1,Fp1,Fp2,Fst2,Ast1,Ap,Ast2',fk1,ft1,ft2,fk2,rs,rp,rs,[Fs]) % ОБЪЕКТ fdesign ДЛЯ ПФ disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt') disp('%') disp('%')disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>') pause **F** bandpass = design(MAG bandpass,'ellip','MatchExactly', 'both','FilterStructure','df2sos') % ПФ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования нажмите <ENTER>') pause **F_bandpass_scale** = scale(F_bandpass) <u>% РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ</u> disp('%') disp('%') disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗАВЕРШЕН')

13.4.4. Синтез и анализ БИХ-фильтра РФ

Листинг script-файла lr_13_stopимеет вид:

```
>> type lr 13 stop
script
clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) РФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0:
while DATA==0;
Nb = input('Nb = ');% НОМЕР БРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ в Гц
ft1 = input('ft1 = '); \% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 в Гц
fk1 = input('fk1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 в Гц
\mathbf{fk2} = \mathbf{input}(\mathbf{fk2} = \mathbf{'}); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 в Гц
ft2 = input('ft2 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 в Гц
rp= input('rp = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП
rs = input('rs = ');% МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('-->');
end
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('\%')
disp('% п.2. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И
П РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров РФ нажмите <ENTER>')
pause
ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ
```

WDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХНОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ [R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА РФ БАТТЕРВОРТА [**R2.WDn2**] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [**R4,WDn4**] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОР<u>ЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА</u> БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [b1,a1] = butter(R1,WDn1,'stop');% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФБАТТЕРВОРТА [b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2,'stop');% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФЧЕБЫШЕВА I РОДА [b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3,'stop'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФЧЕБЫШЕВА **П РОДА** [b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4,'stop'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров РФ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['R1 = 'num2str(R1), 'R2 = 'num2str(R2), 'R3 = 'num2str(R3), 'R4 = 'num2str(R4)]) disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ РФ') disp('%') disp('%')

disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ РФ (ЧЕТЫРЕ ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА) нажмите<ENTER>') pause figure('Name', 'Bandstop IIR Filter Butterworth', 'NumberTitle', 'off') plot iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ БАТТЕРВОРТА figure('Name','Bandstop IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle', 'off') plot iir(b2,a2,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА figure('Name','Bandstop IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle', 'off') plot iir(b3.a3.Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА II РОДА figure('Name', 'Bandstop IIR Filter Elliptic', 'NumberTitle', 'off') plot iir(b4,a4,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%')disp('%') disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА І И ІІ РОДА И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода граничных частот АФП РФ ПП1 (Ft1), ПЗ1 (Fk1), ПЗ2 (Fk2) и ПП2 (Ft2) нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%')ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП иПЗ БИХ-ФИЛЬТРА Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ АФП disp(['Ft1 = 'num2str(Ft(1)), 'Fk1 = 'num2str(Fk(1)), 'Fk2 = 'num2str(Fk(1))

```
num2str(Fk(2)),' Ft2 = ' num2str(Ft(2))])
disp('%')
```

disp('%')

disp('% ДлясинтезаАФПРФнажмите<ENTER>')

pause

```
Wp = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk;<u>% ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ КРУГОВЫХ</u>
<u>ЧАСТОТ</u>
ПП и ПЗ АФП
```

[Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП РΦ БАТТЕРВОРТА [Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА ΑΦΠ ΡΦ ЧЕБЫШЕВА І РОДА [Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФПPΦ ЧЕБЫШЕВА II РОДА [Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП PΦ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА [bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФБАТТЕРВОРТА [bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'stop','s');% КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФЧЕБЫШЕВА **І РОДА** [bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФЧЕБЫШЕВА **П РОДА** [bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА disp('%') disp('%') disp('% Для вывода порядков АФП РФ нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp(['Ra1 = 'num2str(Ra1), 'Ra2 = 'num2str(Ra2), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3 = 'num2str(Ra2), 'Ra3), 'Ra3),num2str(Ra3), Ra4 = 'num2str(Ra4)disp('%') disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, **ЧЕБЫШЕВА І И ІІ РОДА** И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>')

pause

```
f =0 :((Fs/2)/1000):Fs/2;% СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ
W = 2.*pi.*f;
Ha1 = freqs(bs1,as1,W);
                              % ЧХ АФП БАТТЕРВОРТА
Ha2 = freqs(bs2,as2,W);
                              % ЧХАФПЧЕБЫШЕВА І РОДА
Ha3 = freqs(bs3,as3,W);
                              % ЧХАФПЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА
                               % ЧХАФПЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
Ha4 = freqs(bs4,as4,W);
figure('Name','Bandstop Analog Filter — Magnitude','NumberTitle', 'off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Дляпродолжениянажмите<ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ
ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG bandstop =
fdesign.bandstop('Fp1,Fst1,Fst2,Fp2,Ap1,Ast,Ap2',ft1,fk1,fk2,ft2,rp,rs,rp,[Fs])
% ОБЪЕКТ fdesign ДЛЯ РФ
disp('%')
disp('\%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
```

F bandstop = design(MAG bandstop,'ellip','MatchExactly', 'both','FilterStructure','df2sos') % РФВВИДЕОБЪЕКТА dfilt disp('%')disp('%') disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>') pause disp('%') disp('%') disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА') disp('%') disp('%') disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования нажмите <ENTER>') pause **F** bandstop scale = scale(F bandstop,'L2') $\frac{\%}{2}$ РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ disp('%') disp('%') disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗАВЕРШЕН')

13.4.5. Используемые внешние функции

В script-файлах lr_13_low, lr_13_high, lr_13_pass и lr_13_stop используется внеш-

няя функция plot_iir, предназначенная для вывода графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ и карты нулей и полюсов БИХ-фильтра:

function plot_iir(b,a,Fs)

% Вывод графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ и карты нулей и полюсов БИХ-фильтра %

% b — вектор коэффициентов числителя передаточной функции

% а — вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции

% Fs — частота дискретизации (Гц)

%

% М — длина ИХ БИХ-фильтра, ограниченная до 50-ти отсчетов

% n — вектор дискретного нормированного времени

% h — вектор отсчетов ИХ

% f — сетка частот (Гц) для расчета АЧХ и ФЧХ

% Н — частотная характеристика

% MAG и PHASE — АЧХ и ФЧХ

%

M = 50;

n = 0:(M-1); h = impz(b,a,M); f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; H = freqz(b,a,f,Fs); MAG = abs(H); PHASE = phase(H); subplot(2,2,1), plot(f,MAG), xlabel('f (Hz)') title('MAGNITUDE'), grid, ylim([0 1.2]) subplot(2,2,2), zplane(b,a), title('Z-plane zero-pole plot'), grid subplot(2,2,3), plot(f,PHASE), xlabel('f (Hz)') title('PHASE'), grid subplot(2,2,4), stem(n,h,'fill','MarkerSize',3)xlabel('n'), title('Impulse Response'), grid

13.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании functionфайлов для синтеза БИХ-фильтра ФНЧ методом билинейного Zпреобразования, анализа его характеристик и моделирования процесса цифровой фильтрации. Пункты самостоятельного задания включают в себя:

1С. Синтез БИХ-фильтра ФНЧ Золотарева—Кауэра с произвольными требованиями к характеристике затухания (входные параметры function-файла). Вывести графики ИХ, АЧХ и ФЧХ с помощью function-файла plot_iir (см. разд. 13.4.5), который хранится на диске в папке LAB_DSP\LAB_13. Выходными параметрами function-файла являются векторы коэффициентов БИХ-фильтра.

2С. Дублирует п. 2С в разд. 11.5 для БИХ-фильтра (см. п. 1С).

3С. Дублирует п. 2С в разд. 11.5 для БИХ-фильтра (см. п. 1С).

4С. Синтез БИХ-фильтра ФНЧ Золотарева—Кауэра с выбранной структурой звеньев в виде объекта dfilt на основе объекта fdesign с произвольными требованиями к характеристике затухания (входные параметры function-файла).

Выполнить масштабирование на основе нормы 'L2'.

Выходным параметром function-файла является имя объекта dfilt.

13.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения пунктов задания, включая заполненную табл. 13.7, созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure), описания структур БИХ-фильтров в виде объектов dfilt, копируемые из окна Command Window (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка: 1. Дайте определение порядка БИХ-фильтра.

2. Как определить устойчивость БИХ-фильтра?

3. Можно ли синтезировать БИХ-фильтр с линейной ФЧХ?

4. Запишите передаточную функцию и разностное уравнение БИХфильтра.

5. Дайте определение характеристики затухания АЧХ (дБ).

6. Что входит в требования к характеристике затухания БИХ-фильтра?

7. Перечислите основные этапы процедуры синтеза БИХ-фильтра методом билинейного Z-преобразования.

8. Дайте определение частоты среза.

9. Как связаны граничные частоты АЧХ АФП с граничными частотами АЧХ БИХ-фильтра?

10. Назовите четыре типа БИХ-фильтров и поясните вид их АЧХ.

11. Что отображает структура ЦФ и чем определяется ее вид?

12. Какому виду передаточной функции соответствует каскадная структура БИХфильтра?

13. Какую структуру могут иметь биквадратные звенья в каскадной структуре?

14. С какой целью выполняется расстановка и масштабирование звеньев?

Использованные источники:

1. Цифровая обработка сигналов и МАТLАВ: учеб. пособие / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 512 с.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Составитель: д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В.

Компьютерный набор Кузьменко Р.В.

Подписано к изданию _____ Уч.- изд. л. ____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394026 Воронеж, Московский просп., 14