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 лабораторных работ № 4 (часть 1) по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Воронеж 2022

УДК 621.391.083.92
ББК 32.811.3

Составитель:
д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В

Цифровая обработка сигналов: методические указания к выполнению лабораторных работ № 4 (часть 1) 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, 2022. – 27 с.

Основной целью указаний к выполнению лабораторных работ является поддержка выработка навыков цифровой обработки сигналов и средств их компьютерного моделирования в системе MATLAB.

Издание предназначено для проведения лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов 4-го курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЦОС Лаб. работа № 4 (часть 1).docx

Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.391.083.92
ББК 32.811.3

Рецензент: Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Конструирования и производства радиоаппаратуры» Башкиров А.В.

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

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):

$$X(k)\sum_{n=0}^{N-1} x(n)WN, k = 0,1,\dots,N-1; \qquad 9.1)$$

ОбраноеДПФ(ОДПФ) (Inverse Discrete Fourier Transform — IDFT):

$$x(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X(k)WN, n = 0,1,\dots,N-1, \qquad 9.2)$$

где n — дискретноенормированноевремя$n = nT/T$; k — дискретная нормированная частота $k = k\Delta\omega/\Delta\omega$; $\Delta\omega = \omega_д/N = 2\pi/NT$— 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:

$$f = kf_д/N \qquad 9.3)$$

Дискретное преобразование Фурье (9.1) трактуется по-разному в зависимости от вида последовательности x (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:

$$\begin{cases} 1/N, k = 0 \\ 2/N, k \neq 0 \end{cases} \qquad 9.4)$$

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 $\omega_{д} = 2\pi/T$ (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 $\Delta = ff_{д}/N$:

$$f_i = \Delta qf, q = 0,1,\dots,(N-1) \qquad 9.5)$$

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

$$P_i = \frac{NT}{T_i} = \frac{Nf_i}{f_{д}} \qquad 9.6)$$

является целым числом.

В случае, если условие (9.5) не выполняется, наблюдается эффект растекания спектра, который рассматривается в разд. 10.1.1.

В MATLAB ДПФ (9.1)—(9.2) вычисляется с использованием алгоритмов БПФ[1] и ОБПФ с помощью функций:

X = fft(x)

x = ifft(X)

[1] Выбор конкретного алгоритма БПФ скрыт от пользователя и осуществляется автоматически в зависимости от длины исходной последовательности.

где x 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.

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 ε, 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 ε_1 значение модуля ДПФ |X(k)| относят к полезному сигналу, если выполняется условие:

$$\frac{|X(k)|}{max|X(k)|} > \varepsilon 1; \qquad 9.7)$$

- второй критерий — при заданном пороге ε_2 значение модуля ДПФ |X(k)|относят к полезному сигналу, если выполняется условие:

$$\frac{|X(k)|^2}{Pcp} > \varepsilon 2 \qquad 9.8)$$

где $P_{ср}$ — средняя мощность аддитивной смеси сигнала с шумом:

$$Pcp = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \qquad 9.9)$$

Значение порога ε_1 в первом критерии (9.7) задается в пределах:

$$\frac{max|X(k)_{\text{шума}}|}{max|X(k)|} < \varepsilon_1 < 1 \qquad (9.10)$$

а порога ε_2 во втором критерии (9.8) — в пределах:

$$\frac{min|X(k)\text{сигн}|^2}{Pcp} < \varepsilon 2 \leq \frac{max|X(k)^2|}{Pcp} \qquad (9.11)$$

при условии, что

$$|X(k)_{\text{сигн}}| > max\left|X(k)_{\text{шума}}\right| \qquad (9.12)$$

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 ε_1 или ε_2 задается исходя из требований конкретной задачи.

9.1.3. Восстановление спектральной плотности

Спектральная плотность конечной последовательности x(n) длины N:

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega Tn} \qquad (9.13)$$

на периоде ω = $\pi_д$ 2/T связана с отсчетами ДПФ X(k) (9.1) соотношением:

$$X(k) = X(e^{j\omega T})|_{\omega=k\frac{2\pi}{NT}}, \ k=0, 1, \ldots, N-1. \qquad (9.14)$$

Значения спектральной плотности (9.13) в L равноотстоящих точках на периоде ω при L N> определяются по формуле:

$$X\left(e^{j\frac{2\pi}{L}l}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{L}ln}, l = 0,1,\ldots,L-1 \qquad (9.15)$$

где l — дискретная нормированная частота, а Δω — период дискретизации по частоте:

$$\Delta\omega = \omega д/L = 2\pi/LT \qquad (9.16)$$

Тот же результат будет получен, если конечную последовательность x(n) длины N дополнить нулями до длины L:

$$\tilde{x}(n) = \begin{cases} x(n), 0 \le n \le (N-1) \\ 0, N \le n \le (L-1) \end{cases} \qquad (9.17)$$

и найти ее ДПФ (9.1), заменяя N на L:

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} \tilde{x}(n)W_L^{nk}, k = 0, 1, \ldots, L-1 \qquad (9.18)$$

С учетом (9.17) формула (9.18) принимает вид (сравните с (9.15)):

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_L^{nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2k}{L}kn}, k = 0,1,\ldots,L-1$$

Следует помнить, что разрешение по частоте, под которым понимают минимальное расстояние между дискретными гармониками в ДПФ, определяется исключительно периодом дискретизации по частоте $\Delta f = f_д/N$ и при фиксированной частоте $f_д$ зависит только от длины (периода) 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 $\Delta = f f_д/L$, 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[1] (−N/2) ≤ k ≤ (N/2-1), по формуле (усеченный ряд Фурье):

$$x(t) = \frac{1}{N}\sum_{k=-N/2}^{N/2-1} Xa(k)e^{j\frac{2\pi}{NT}kt} \quad (9.19)$$

где отсчеты $X_a(k)$ связаны с отсчетами ДПФ X(k) соотношением:

$$X_a(k) = \begin{cases} X(N+k), & -N/2 \le k \le -1; \\ X(k), & 0 \le k \le (N/2-1) \end{cases} \quad (9.20)$$

Тот же результат будет получен при восстановлении аналогового сигнала непосредственно с помощью усеченного ряда Котельникова:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\frac{sin\left[\pi\left(\frac{t}{T}-n\right)\right]}{\pi\left(\frac{t}{T}-n\right)} \quad (9.21)$$

В MATLAB 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 function-файлов 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

$N_{бр}$, где $N_{бр}$ =1, 2, ...,30 . Функция $N_{бр}$ mod M в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{бр}$ 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.

Таблица 9.1. Таблица исходных данных

Переменная	**Назначение**	**Значение**	**Идентификатор**
$N_{бр}$	Номер бригады	$N_{бр}$	Nb =

[1]При N — четном, и в области –(N-1)/2≤ k ≤ (N-1)/2 — при N нечетном.

N	Период (длина) последовательности	N=64	N = 64
$f_д$	Частота дискретизации	$f_Д$ = 2000($N_{бр}$ mod 5 + 1)	Fs =

Таблица 9.1 (окончание)

Переменная	**Назначение**	**Значение**	**Идентификатор**
T	Период дискретизации	T =1/$f_д$	1/Fs
A_1	Амплитуды дискретных гармоник	A_1 = +10,01$N_{бр}$	A1 =
A_2		$A_2 = 2A_1$	A2 =
f_1	Частоты дискретных гармоник	$f1 = fд/8$	f1 =

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:

$$x(nT) = A_1\cos(2\pi f_1 nT + \pi/4) + A_2\cos(2\pi f_2 nT + \pi/8) \quad (9.22)$$

используя ее тождественное представление в виде: (9.23)

$$x(n) = A_1\cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_д}n + \frac{\pi}{4}\right) + A_2\cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_д}n + \frac{\pi}{8}\right) = A_1\cos\left(\widehat{\omega}_1 n + \frac{\pi}{4}\right) + A_2\cos\left(\widehat{\omega}_2 n + \frac{\pi}{8}\right) \quad (9.23)$$

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:

- 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:

---

[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.

$$s(n) = x(n) + r(n). \qquad (9.24)$$

Для аддитивной смеси s(n) (9.24) определить:

- граничные значения порога ε_1 для первого критерия (9.7) (идентификаторы e1_low и e1_up);

- граничные значения порога ε_2 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 ε_1.

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 ε_2 .

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 ε_2 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∈[0;(N-1)]T с шагом Δt = 0,25T.

В тех же точках вычислить значения исходного аналогового сигнала $x_{исх}(t)$ (идентификатор xt), на основе которого получена последовательность x (nT)

(9.22):

$$x_{исх}(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \pi/4) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \pi/8) \qquad (9.25)$$

Вывести графики:

- периодической последовательности x (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 $\widetilde{\omega}_д = 2\pi$ 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 = '); % ЧАСТОТА 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
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); % ПЕРИОДИЧЕСКАЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
X = fft(x); % ДПФ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
MOD = (2/N)*abs(X); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
MOD(1) = (1/N)*abs(X(1));
PHASE = angle(X); % ФАЗОВЫЙ 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')
ylabel('x(nT)'), title(strcat(['Periodic Sequence x(nT) N = ',num2str(N)]))
x = ifft(X); % ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ,
ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ОДПФ
subplot(3,1,3), stem(n,x,'MarkerSize',3,'Linewidth',2)
grid, xlabel('n')
ylabel('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(strcat(['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(strcat(['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(strcat(['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)); % МОДУЛЬ ДПФ КОНЕЧНОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
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'), ylabel('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); % АМПЛИТУДЫ ДИСКРЕТНЫХ
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); % НОРМАЛЬНЫЙБЕЛЫЙШУМ
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); % АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР ШУМА
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; % ВЕРХНЯЯ 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(strcat(['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 e2 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 ВЫДЕЛЕНИЯ
АМПЛИТУД 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)
i = 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)); % ВОССТАНОВЛЕНИЕ
АНАЛОГОВОГО
СИГНАЛА
end
xa(i) = (1/N).*s; % ЗНАЧЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО АНАЛОГОВОГО
СИГНАЛА
i = i+1;
end
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); % ЗНАЧЕНИЯ
ИСХОДНОГО
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(strcat(['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(strcat(['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
XW(l+1) = S; % ЗНАЧЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ 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
l = 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(strcat(['DFT Modulus N = ',num2str(N)]))
subplot(3,1,2), plot(w,abs(XW),'MarkerSize',3,'Linewidth',2)
grid, xlabel('w'), ylabel('|X(w)|')
title(strcat(['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(strcat(['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 i = 1:length(L)
xz = [xzeros(1,(L(i)-N))]; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ДОПОЛНЕННАЯ
НУЛЯМИ ДО
ДЛИНЫL(i)
XZ = fft(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('% Для вывода ПЕРИОДОВ ДПФ и ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПО ЧАСТОТЕ нажмите
<ENTER>')
pause
disp('%')
disp([' L = [',num2str(L) ']'])
disp('%')
disp([' Delta_f = [',num2str(Delta_f) ']'])
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 ε1 (9.10) (e1) относят к полезномусигналу:

```
function [MODm,m] = fft_e1(MODX,e1)
% Определение значений модуля ДПФ и частот полезного сигнала
%
% MODX — вектор значений модуля ДПФ смеси сигнала с шумом
% e1 — заданный порог
%
% MODm — вектор значений модуля ДПФ полезного сигнала
% m — 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 ε2 (9.11) (e2) относят к полезному сигналу:

```
function [MODm,m] = fft_e2(MODX,e2)
% Определение значений модуля ДПФ и частот полезного сигнала
%
% MODX — вектор значений модуля ДПФ смеси сигнала с шумом
% e2 — заданный порог
%
% MODm — вектор значений модуля ДПФ полезного сигнала
% m — 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 :

$$x(n) = A_1\cos(\widehat{\omega}_1 n + \pi/4) + A_2\cos(\widehat{\omega}_2 n + \pi/16) \tag{9.26}$$

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:

$$x_1(n) = \begin{matrix} x_2(n), n = 0, \dots, N\ 2 - 1; \\ x_3(n), n = N\ 2, \dots, N - 1 \end{matrix} \tag{9.27}$$

где

$$x_2(n) = A_1\cos(\widehat{\omega}_1 n), n = 0, \dots, N/2 - 1\,;$$
$$x_3(n) = A_2\cos(\widehat{\omega}_2 n), n = 0, \dots, N/2 - 1\,;$$

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):

$$x(n) = C[1 + mcos(\Omega n + \varphi_\Omega)]\cos(\widehat{\omega}_0 n + \varphi_0)\ .$$

Задать значения C=1, $\widehat{\omega}_0 = 2\pi/4$,$\phi_0$=0, $\Omega = \widehat{\omega}_0/4$, ϕ_Ω=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 a= 0,0005 и $\omega\hat{}_1$ =π/12 .

Вывести графики последовательности на интервале n∈[-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?

Использованные источники:

1. Цифровая обработка сигналов и MATLAB: учеб. пособие / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 512 с.
2. Воробьев С.Н. Цифровая обработка сигналов : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С.Н. Воробьев. - М. : Академия, 2013. - 320 с.
3. Голубинский А.Н. Теория цифровой обработки сигналов : учеб, пособие / А.Н. Голубинский, С.В. Ролдугин, И.В. Лазарев. - Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2009. - 132 с.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 4 (часть 1) 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 Р.В. Кузьменко

Подписано к изданию__________
Уч-изд. л._________

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14