

**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 2) 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 2) 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. – 26 с.

Основной целью указани 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 2).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 работа №4

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

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):

$$P_i = \frac{NT}{T_i} = \frac{Nf_i}{f_d} \quad (10.1)$$

оказывается не целым числом, а частота гармоники f_i — не кратной периоду дискретизации по частоте $\Delta f = f_d/N$ (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.

Для уменьшения эффекта растекания спектра (полностью он принципиально неустраним) применяют *весовые функции* (окна) — вещественные неотрицательные последовательности, максимальные в центре и монотонно спадающие к границам, что ослабляет влияние разрывов при периодическом продолжении последовательности. Для стандартных окон MATLAB значения $w_n()$ вычисляются автоматически по известным 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 $\Delta f = f_d/N$ (см. разд. 9.1.3).

Для улучшения различения дискретных гармоник с близко расположенными частотами f_1 и f_2 , расстояние между которыми удовлетворяет условию:

$$\Delta f < |f_1 - f_2| < 2\Delta f \quad (10.2) \quad \begin{matrix} \text{исхо} \\ \text{дную} \\ \text{последова} \end{matrix}$$

тельность надо дополнить нулями до длины L :

$$L \geq \frac{f_d}{|f_1 - f_2| - \Delta f} \quad (10.3)$$

Затем по L точкам восстановить спектральную плотность с периодом дискретизации по частоте $\tilde{\Delta} = f_d / L$ 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 не кратными 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`:

$$X = \text{fft}(x, L)$$

где x — N -точечная последовательность; L — длина последовательности, автоматически дополненной нулями; X — L -точечное ДПФ.

10.1.3. Вычисление линейных и круговых сверток с помощью ДПФ

Ранее (см. разд. 8.1.1) была рассмотрена функция `conv` для вычисления реакции по формуле свертки

$$y(n) \sum_{m=0}^{L-1} h(n-m)x(m) = \sum_{m=0}^{L-1} h(m)x(n-m) \quad (10.4)$$

где $L = N_1 + N_2 - 1$ — длина линейной (апериодической) свертки, а N_1 и N_2 — 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

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x_1(m)x_2[(n-m) \bmod N] = \sum_{m=0}^{N-1} x_1[(n-m) \bmod N]x_2(m) \quad (10.5)$$

где записи $(n-m) \bmod N$ соответствует значение $(n-m)$ по модулю N .

Для вычисления круговой свертки (10.5) рассчитывается N -точечное ДПФ, равное произведению N -точечных ДПФ сворачиваемых последовательностей:

$$X(k) = X_1(k)X_2(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10.6)$$

а затем с помощью ОДПФ — 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 :

$$y(n) = \sum_{m=0}^{L-1} \tilde{h}[(n-m) \bmod L] \tilde{x}(m) = \sum_{m=0}^{L-1} \tilde{h}(m) \tilde{x}[(n-m) \bmod L] \quad (10.7)$$

где $\tilde{h}(n)$ и $\tilde{x}(n)$ — дополненные нулями последовательности $h(n)$ и $x(n)$.

Рассчитывается L -точечное ДПФ круговой свертки (10.7):

$$Y(k) = H(k)X(k), k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (10.8)$$

а затем с помощью ОДПФ — реакция $y(n)$.

В MATLAB для вычисления линейной свертки на основе круговой свертки с использованием алгоритмов БПФ и ОБПФ предусмотрена функция: $y = \text{fftfilt}(h, x)$

где h — импульсная характеристика длины N_1 ; x и y — векторы отсчетов воздействия и реакции одинаковой длины N_2 .

Отметим, что длина реакции равна длине второго аргумента N_2 (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:

$$y = \text{fftfilt}(h, x, L)$$

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; y — 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 помощью ДПФ с использованием программных средств MATLAB.

10.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файла lr_10 и function-файла 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

$N_{бр}$, где $N_{бр} = 1, 2, \dots, 30$. Функция $N_{бр} \bmod M$ в записи исходных данных означает вычисление значения $N_{бр}$ по модулю M .

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\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 Парсевала:

$$\sum_{k=0}^{N-1} x^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2. \quad (10.9)$$

Таблица 10.1. Таблица исходных данных

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
$N_{бр}$	Номер бригады	$N_{бр}$	$Nb =$
N	Длина (период) последовательности	$N=64$	$N = 64$
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 2000(N_{бр} \bmod 5 + 1)$	$Fs =$
A_1	Амплитуды дискретных гармоник	$A_1 = 1 + 0,01N_{бр}$	$A1 =$
A_2		$A_2 = 2A_1$	$A2 =$
f_1	Частоты дискретных гармоник	$f_1 = f_d/4$	$f1 =$
f_2		$f_2 = 1,5 f_1$	$f2 =$
M	Период последовательности	$M = 71$	$M = 71$
f_{11}	Частоты дискретных гармоник	$f_{11} = 1,1f_1$	$f1_1 =$
f_{21}		$f_{21} = 1,07 f_2$	$f2_1 =$
f_{12}	Частоты дискретных гармоник	$f_{12} = 1,05 f_1$	$f1_2 =$
f_{22}		$f_{22} = f_{12} + 1,1 \Delta f_1$, где $\Delta f = \frac{f_d}{N}$	$f2_2 =$ $f1_2 + 1.1 * Fs/N$
$x_3(n)$	Периодическая	$x_3(n) = N_{бр}[0,1; 0,2; 0,3;$	Вектор $x3 = [...]$

	последовательность (период)	0,4; 0,5]	
$x_4(n)$	Периодическая последовательность (период)	$x_4(n) = N_{\text{бп}}[0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1]$	Вектор $x_4 = [...]$
$x_5(n)$	Конечная последовательность	$x_5(n) = N_{\text{бп}}[0,1; 0,2; 0,3]$	Вектор $x_5 = [...]$
$x_6(n)$	Конечная последовательность	$x_6(n) = N_{\text{бп}}[0,3; 0,2; 0,1; 0,2; 0,3]$	Вектор $x_6 = [...]$
b_0 b_1 b_2	Коэффициенты числителя передаточной функции	$b_0 = 0,5 + 0,02N_{\text{бп}}$ $b_1 = b_0(-1)^{N_{\text{бп}}+1}$ $(0,9822 + 0,0178N_{\text{бп}})$ $b_2 = b_0[0,8 + 0,2(N_{\text{бп}} \bmod 5)]$	Вектор $b = [...]$

Таблица 10.1 (окончание)

Переменная	Назначение	Значение	Идентификатор
a_0 a_1 a_2	Коэффициенты знаменателя передаточной функции	$a_0 = 1$ $a_1 = (-1)^{N_{\text{бп}}}(0,7778 + 0,025N_{\text{бп}})$ $a_2 = 0,64 + 0,006N_{\text{бп}}$	Вектор $a = [...]$
N_1	Длина ИХ	$N_1 = N_{\text{бп}} \bmod 10 + 20$	$N_1 =$
N_2	Длина воздействия	$N_2 = N_{\text{бп}} \bmod 10 + 30$	$N_2 =$
N_3	Длина воздействия	$N_3 = N_{\text{бп}} \bmod 10 + 200$	$N_3 =$

Проверить для периодической последовательности (идентификатор x) с периодом N :

$$x(n) = A_1 \cos(2\pi f_1 nT) + A_2 \cos(2\pi f_2 nT) \quad (10.10)$$

используя ее тождественное представление в виде:

$$x(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_d} n\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_d} n\right) = A_1 \cos(\hat{\omega}_1 n) + A_2 \cos(\hat{\omega}_2 n) \quad (10.11)$$

Левая часть равенства (10.9) — идентификатор E_1 , правая — E_2 .

Пояснить смысл равенства Парсеваля.

2. Исследование эффекта растекания спектра для одной дискретной гармоники.

Выполнить для последовательности

$$\tilde{x}(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1 n}{f_d}\right) = A_1 \cos(\hat{\omega}_1 n) \quad (10.12)$$

с двумя значениями периода:

- N — идентификатор последовательности x_N ;
- M — идентификатор последовательности x_M .

Вывести:

- соответствующие значения P (10.1) для частоты дискретной гармоники f_1 — идентификаторы P_N и P_M.

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 $x(n)$ (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:

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{11}; \\ f_2 &= f_{21}; \end{aligned}$$

и для новой последовательности (идентификатор x1) вывести:

- значения P (10.1) для частот дискретных гармоник f_{11} и f_{21} — идентификаторы P1_1 и P2_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:

$$f_1 = f_{12};$$

$$f_2 = f_{22};$$

$f_2 = f_{22}$, и для новой последовательности (идентификатор x2) вывести:

- разрешение по частоте $\Delta f = f_d/N$ (идентификатор Delta_N);
- расстояние между частотами $f_{12} - f_{22}$ (идентификатор Delta_f);
- требуемую длину L (10.3) (идентификатор L);
- период дискретизации по частоте $\Delta \tilde{f} = \frac{f_d}{L}$ (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 $k \in [0; \text{int}(L/2)-1]$.

Частоты первого пика определяются с помощью функции max.

Для определения частоты второго пика следует найти пики справа и слева от первого пика на периоде дискретизации $\Delta f = f_d/N$ с помощью функции max и выбрать наибольший из них.

Справа и слева от первого пика на интервале $\Delta f = f_d/N$ расположено

$K = \text{int}(\Delta f / \Delta \tilde{f}) = \text{int}(L/N)$ 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 $y_{34}(n)$ (идентификатор y34) 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 гермат.

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 y56_1);
- с помощью функции fftfilt (идентификатор y56_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 $x_7(n)$ (идентификатор x_7) выбрать дискретный прямоугольный импульс длины N_2 :

$$x_7(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq \text{int}(N_2/2); \\ 0, & \text{int}(N_2/2) \leq n \leq (N_2 - 1). \end{cases} \quad (10.13)$$

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 $y_7(n)$ по формуле свертки (10.4) двумя способами:

- с помощью функции `conv` (идентификатор y_{7_1});
- с помощью функции `fftfilt` (идентификатор y_{7_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 x_8) выбрать прямоугольный импульс $x_7(n)$ (10.15) длины N_3 .

Вычислить реакцию $y_8(n)$ по формуле свертки двумя способами:

- с помощью функции `fftfilt` без перекрытия (идентификатор y_{8_1});
- с помощью функции `fftfilt` методом перекрытия с накоплением (идентификатор y_{8_2}), задавая длину секции равной длине ИХ N_1 .

Вывести графики ИХ, воздействия и реакций в одинаковом диапазоне по оси абсцисс с помощью функции `xlim([0 N3-1])`, где N_3 — 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 своего номера бригады Nбр .

Для запуска лабораторной работы необходимо обратиться к script-файлу lr_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 = '); % ДЛИНА (ПЕРИОД) ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
```

```
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 НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА
w1 = 2*pi*f1/Fs; w2 = 2*pi*f2/Fs; % НОРМИРОВАННЫЕ ЧАСТОТЫ
ДИСКРЕТНЫХ ГАРМОНИК (РАД)
x = A1*cos(w1*n)+A2*cos(w2*n); % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ(ПЕРИОД N)
X = fft(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 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
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)
k = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (ПЕРИОД N)

```

```

w1 = 2*pi*f1/Fs; % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (РАД)
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 M)
k1 = 0:(M-1); % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА (ПЕРИОД M)
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 M)
MOD_M(1) = (1/M)*abs(X_M(1));
P_N = N*f1/Fs; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ N
P_M = M*f1/Fs; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ ГАРМОНИКИ С
ЧАСТОТОЙ f1
НА ПЕРИОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ M
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ЧИСЛА ПЕРИОДОВ дискретной гармоник 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(strcat(['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('% п.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ  

РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ ОКНА')
win_M = hamming(M); % ОКНО ХЭММИНГА — ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ДЛИНЫ  

M
xw_M = x_M.*win_M; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ВЗВЕШЕННАЯ ОКНОМ
XW_M = fft(xw_M); % ДПФ ВЗВЕШЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
MODW_M = (2/M)*abs(XW_M); % АМПЛИТУДНЫЙ 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(strcat(['Amplitude spectrum without windowing M = ',num2str(M)]))
subplot(2,1,2), stem(k1,MODW_M,'MarkerSize',3), grid, xlabel('k')
title(strcat(['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
n = 0:(N-1); % ДИСКРЕТНОЕ НОРМИРОВАННОЕ ВРЕМЯ
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
P2_1 = N*f2_1/Fs; % ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОЙ 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); % ОКНО ХЭММИНГА — ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ДЛИНЫ
N
xw1 = x1.*win_N; % ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ, ВЗВЕШЕННАЯ ОКНОМ
(ПЕРИОД N)
XW1 = fft(xw1); % ДПФ ВЗВЕШЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
(ПЕРИОД N)
MODW1 = (2/N)*abs(XW1); % АМПЛИТУДНЫЙ 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; % РАЗРЕШЕНИЕ ПО ЧАСТОТЕ
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('%')
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); % КОНЕЧНАЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
X2 = fft(x2); % ДПФ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛИНЫ N
MOD2 = abs(X2); % МОДУЛЬ ДПФ
X2_L = fft(x2,L); % ДПФ КОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ,
ДОПОЛНЕННОЙ
НУЛЯМИ ДО ДЛИНЫ L
MOD2_L = abs(X2_L); % МОДУЛЬ ДПФ
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ N-ТОЧЕЧНОГО ДПФ и МОДУЛЯ
СПЕКТРАЛЬНОЙ')
disp('% ПЛОТНОСТИ, ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПО L ТОЧКАМ, нажмите
<ENTER>')
pause
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(strcat(['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 MODm И ИНДЕКС m
ВЕКТОРА MOD2_L
(ПЕРВЫЙ ПИК)
k_1 = (m-1); f_1 = k_1*Delta_L; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ И
АБСОЛЮТНАЯ
(Гц) ЧАСТОТЫ ПЕРВОГО ПИКА

```

$K = \text{ceil}(L/N)$; % КОЛИЧЕСТВО ОТСЧЕТОВ НА ПЕРИОДЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ F_s/N

$K1 = m+K$; $K2 = m+2*K-1$; % НИЖНЯЯ $K1$ и ВЕРХНЯЯ $K2$ ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛА

ПРИ ПОИСКЕ ВТОРОГО ПИКА СПРАВА

$[MODm1 \ m1] = \max(MOD2_L(K1:K2))$; % МАКСИМУМ $MODm1$ И ИНДЕКС $m1$ МОДУЛЯ ДПФ

$MOD2_L$ НА ИНТЕРВАЛЕ $[K1 \ K2]$

$K3 = m-(2*K-1)$; $K4 = m-K$; % НИЖНЯЯ $K3$ и ВЕРХНЯЯ $K4$ ГРАНИЦЫ ИНТЕРВАЛА

ПРИ ПОИСКЕ ВТОРОГО ПИКА СЛЕВА

$[MODm2 \ m2] = \max(MOD2_L(K3:K4))$; % МАКСИМУМ $MODm2$ И ИНДЕКС $m2$ МОДУЛЯ ДПФ

$MOD2_L$ НА ИНТЕРВАЛЕ $[K3 \ K4]$

if ($MODm1 > MODm2$)

$k_2 = (K1+m1-1)-1$; $f_2 = k_2 * \Delta L$; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ И АБСОЛЮТНАЯ ($\Gamma_{ц}$) ЧАСТОТЫ ВТОРОГО ПИКА, ЕСЛИ ОН СПРАВА ОТ ПЕРВОГО

else

$k_2 = (K3+m2-1)-1$; $f_2 = k_2 * \Delta L$; % ДИСКРЕТНАЯ НОРМИРОВАННАЯ И АБСОЛЮТНАЯ ($\Gamma_{ц}$) ЧАСТОТЫ ВТОРОГО ПИКА, ЕСЛИ ОН СЛЕВА ОТ ПЕРВОГО

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); % ПЕРИОД КРУГОВОЙ СВЕРТКИ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода графиков ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ и КРУГОВОЙ свертки (3 периода) нажмите<ENTER>')
pause
figure('Name','Sequences x3, x4, y34','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
y56_1 = conv(x5,x6); % ЛИНЕЙНАЯ СВЕРТКА,ВЫЧИСЛЕННАЯ С
ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
conv
y56_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
b = input('b = '); % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧИСЛИТЕЛЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ
ФУНКЦИИ
a = input('a = '); % КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ
ФУНКЦИИ
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
x7 = input_1(N2); % ВОЗДЕЙСТВИЕ
y7_1 = conv(x7,h); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ
conv
y7_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 y7(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 y7(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 = '); % 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
x8 = input_1(N3); % ВОЗДЕЙСТВИЕ
y8_1 = fftfilt(h,x8); % РЕАКЦИЯ, ВЫЧИСЛЕННАЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ  

fftfilt
y8_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 y8(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('% РАБОТА ЗАВЕРШЕНА')
```

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 function-файлов 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 P (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 векторов-столбцов:

$WIN(:,1) = \text{hamming}(N);$

$WIN(:,2) = \text{hanning}(N);$

ит. д. Имена окон найтив GUIWindowDesignandAnalysisTool (команда wintool).

3С. 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 N_1 .

В качестве воздействия выбрать последовательность с однотоновой амплитудной модуляцией (7.23):

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

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.

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 2) 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