

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИНК

_____ Бориков В.Н.

« ____ » _____ 2016 г.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ MATLAB

Методические указания

по выполнению лабораторной работы №7

по курсу «Методы и средства обработки измерительных сигналов»

Томск – 2016

ББК 32.811.1я73
УДК 621.372.037(075.8)
Я 45

Якимов Е.В. Спектральный анализ в пакете программ MATLAB: методические указания по выполнению лабораторной работы №7 – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2016. – 16 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию
методическим семинаром кафедры Физических методов и приборов
контроля качества ТПУ
«12» 04 2016 г. протокол № 9

Зав. кафедрой ФМПК _____ Суржиков А.П.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
Физических методов и приборов контроля качества ТПУ
Е.М. Фёдоров

Томский политехнический университет, 2016

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

- 1.1. изучение функций MATLAB Simulink для анализа спектра сигналов;
- 1.2. исследование преобразования спектра сигналов при прохождении через аналоговые фильтры.

2. КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

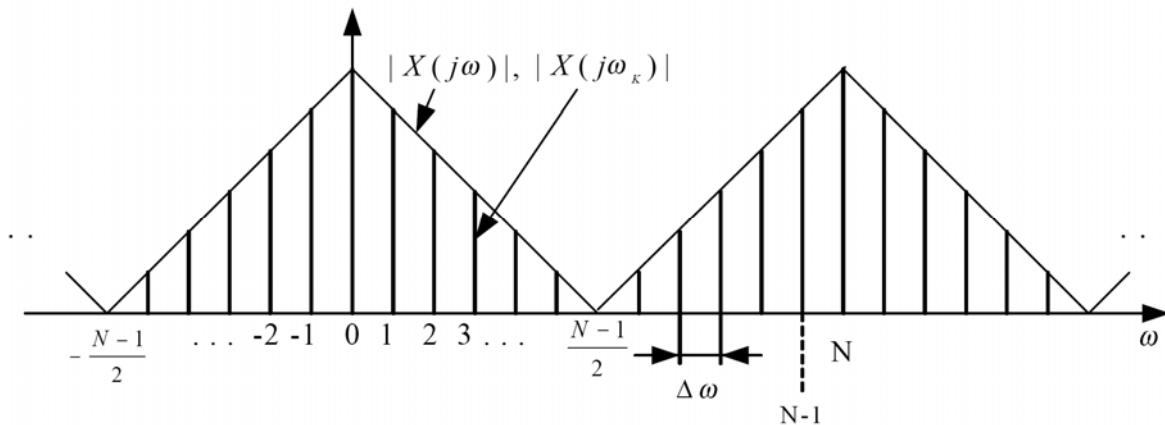
2.1. Анализ спектра сигналов методом ДПФ (БПФ)

2.1.1. Дискретное преобразование Фурье

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ), иллюстрируемое [рис. 1](#), соответствует выборкам **непрерывного преобразования Фурье** (или спектра) $X(j \cdot \omega)$ дискретной последовательности $x(n)$ конечной длины N_1 , вычисленным на дискретных равностоящих частотах $\omega_k = k \cdot \Delta\omega$:

$$\text{ДПФ}_N[x(n)] = X(j \cdot \omega)|_{\omega=\omega_k} = \sum_{n=0}^{N_1-1} x(n) \cdot e^{-j \cdot \omega_k \cdot n \cdot T_d} \quad (1)$$

где $\Delta\omega = \omega_d/N$ – шаг дискретизации по частоте; N – число вычисляемых частотных выборок ДПФ в полосе частот $\{0 - \omega_d\}$, в общем случае не равное N_1 ; $k = 0, 1 \dots N-1$ – номер частотной выборки.



[Рис. 1](#). Дискретизация сигнала в частотной области

Выбор шага дискретизации по частоте определяется возможностью восстановления сигнала $x(n)$ и его непрерывного спектра $X(j \cdot \omega)$ по ДПФ.

Восстановление сигнала по дискретизированному по частоте спектру осуществляется с помощью **обратного ДПФ** (ОДПФ):

$$\text{ОДПФ}_N[X(j \cdot \omega_k)] = x_p(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X(j \cdot \omega_k) \cdot e^{j \cdot \omega_k \cdot n \cdot T_d} \quad (2)$$

Сигнал $x_p(n)$ периодичен с периодом N : $x_p(n) = x_p(n - i \cdot N)$, $i = 0, \pm 1, \dots$ и связан с сигналом $x(n)$ соотношением $x_p(n) = \sum_i x(n - i \cdot N)$.

Преобразования ДПФ – ОДПФ (1), (2) представляют как в виде функции дискретной частоты ω_k , так и номера частотной выборки k :

$$\text{ДПФ}_N[x(n)] = X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n}, \quad k = 0, 1 \dots N-1. \quad (3)$$

$$\text{ОДПФ}_N[X(k)] = x(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n}, \quad n = 0, 1 \dots N-1. \quad (4)$$

Вычисление ОДПФ и ДПФ требует N^2 операций умножения и $N \cdot (N-1)$ операций сложения комплексных чисел.

Оба преобразования используют единый вычислительный алгоритм, основанный на их достаточно простой взаимосвязи:

$$\text{ОДПФ}_N[X(k)] = \frac{1}{N} \cdot \left\{ \text{ДПФ}_N[X^*(k)] \right\}^*, \quad (5)$$

где $*$ – операция комплексного сопряжения.

При $N \geq N_1$ $x_p(n) = x(n)$, $n = 0, 1 \dots N-1$, т.е. сигнал $x_p(n)$ на интервале $0 \dots N-1$ точно совпадает с исходным сигналом $x(n)$, дополненным $(N - N_1)$ нулевыми отсчетами и является периодическим его продолжением за пределами этого интервала (рис. 2). ОДПФ, вычисляемое на интервале $0 \dots N-1$, обеспечивает в данном случае точное восстановление сигнала $x(n)$ по его ДПФ.

При $N < N_1$ ($\Delta\omega = \omega_d/N > \omega_d/N_1$) имеет место перекрытие периодизированных с периодом N последовательностей $x(n)$ (явление наложения во временной области), так что $x_p(n) \neq x(n)$ при $n = 0 \dots N_1-1$ (рис. 3). Это исключает возможность точного восстановления сигнала по его дискретизированному спектру.

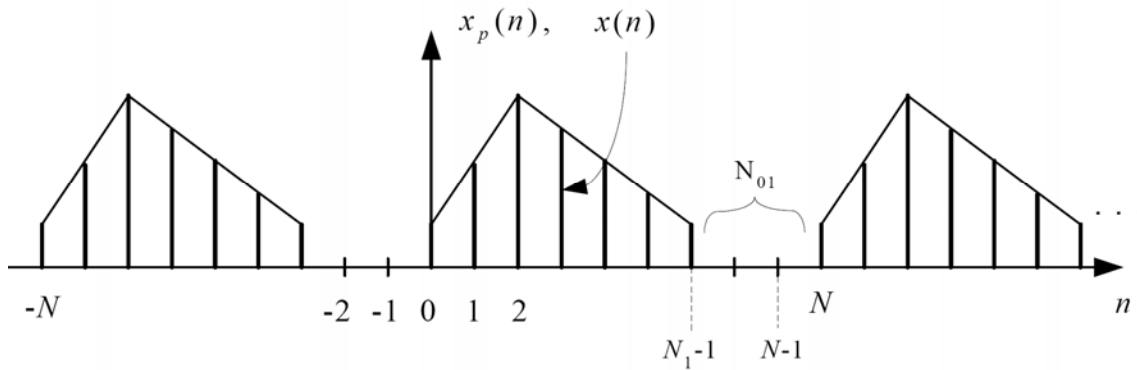


Рис. 2. Сигнал, соответствующий ОДПФ при $N \geq N_1$

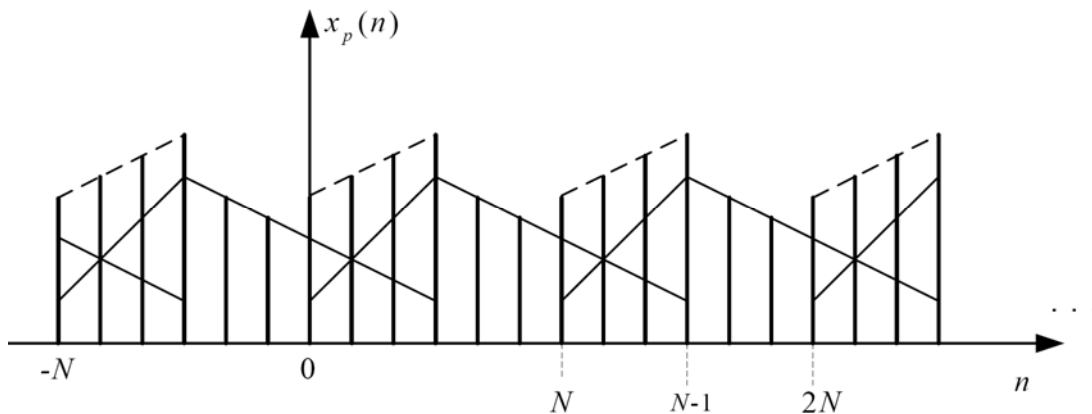


Рис. 3. Сигнал, соответствующий ОДПФ при $N < N_1$

2.1.2. Анализатор спектра на основе ДПФ

В основе анализаторов спектра, использующих ДПФ, лежит базовая структура, приведенная на рис. 4. Она реализует базовые операции анализатора спектра – взвешивание и вычисление ДПФ. Ее выходом является вектор ДПФ входной в общем случае не ограниченной по длине последовательности $x(n)$, усеченной весовой функцией $w(n)$ конечной длины N :

$$\text{ДПФ}_N[\tilde{x}(n)] = \tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n)e^{-j\omega_k \cdot n \cdot T_d} = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n)e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} k \cdot n}, \quad (6)$$

$$k=0, 1, \dots, N-1.$$

Здесь $\tilde{x}(n) = x(n) \cdot w(n)$ – преобразуемая входная последовательность ДПФ; $\omega_k = k \cdot \omega_d / N$ или $f_k = k \cdot f_d / N$ – частоты анализа, называемые также **бинами ДПФ**: 1 бин равен шагу дискретизации сигнала в частотной области f_d / N . Анализатор имеет N разнесенных по частоте на 1 бин (f_d / N) каналов анализа с центральными частотами ω_k (f_k), при этом значения $k=0, 1, \dots, N-1$ соответствуют номеру канала, номеру бина или номеру частотной выборки ДПФ $\tilde{X}(j \cdot \omega_k) = \tilde{X}(k)$. Весовая функция представляет **окно**, через которое наблюдается входной сигнал, длиной ее определяется время анализа $T_a = N \cdot T_d$ или время наблюдения сигнала.

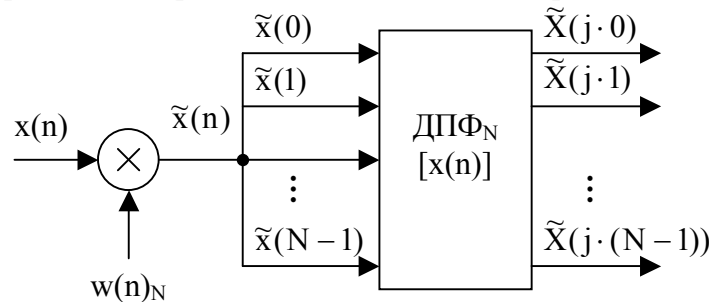


Рис. 4. Структурная схема анализатора спектра на основе ДПФ

Умножению или взвешиванию во временной области соответствует свертка в частотной, поэтому вычисляемое ДПФ фактически является дискретизированной сверткой истинного спектра анализируемого сигнала $X(j \cdot \omega)$ с частотной характеристикой (спектром) весовой функции $W(j \cdot \omega)$:

$$\tilde{X}(j \cdot \omega_k) = X(j \cdot \omega) * W(j \cdot \omega) \big|_{\omega=\omega_k}, \text{ где } * - \text{ символ свертки, т.е. содержит систематическую (методическую) погрешность анализа.}$$

Она является следствием ограничения сигнала по длительности, искажающего результаты спектрального анализа.

Назначение специальных весовых функций или окон – сглаживание или ослабление вызываемого временным усечением влияния или эффекта разрывов сигнала на краях.

2.1.3. Масштабирование результатов анализа спектра по ДПФ

Дальнейшая обработка выходных данных ДПФ осуществляется с учетом измеряемых или оцениваемых с помощью ДПФ спектральных характеристик, зависящих от вида анализируемых сигналов.

Для **периодических сигналов** $x_p(n)$ с периодом $N \cdot T_d$ оценивают амплитуды $A_m(\omega_k)$ и фазы $\phi(\omega_k)$ гармоник с частотой $k \cdot f_d / N$ или их средние за период мощности $[A_m(\omega_k)]^2 / 2$.

Для **детерминированных сигналов конечной длительности** $x(n)$ (непериодических) оценивают:

- спектральную плотность $X(j \cdot \omega)$ размерностью $[B/Гц]$, определяемую ее модулем $|X(j \cdot \omega)|$ и аргументом $\varphi(\omega)$, т.е. амплитудным и фазовым спектрами и вычисляемую на частотах анализа $\omega = \omega_k$ или бинах ДПФ;
- энергетический спектр или спектральную плотность энергии $S_x(\omega)$ ($|X(j \cdot \omega)|^2$) размерностью $[B^2 \cdot c/Гц]$, показывающую распределение энергии сигнала по частоте и также вычисляемую на дискретных частотах ω_k .

При реализации конкретных алгоритмов спектрального анализа различных сигналов важное значение имеет правильное **масштабирование результатов анализа** и учета их размерности [5].

Если ДПФ определяется выражением $X(j \cdot \omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \cdot \omega_k \cdot n \cdot T_d}$, то масштабиро-

вание выполняется следующими ниже указанными способами.

Для вещественного периодического сигнала $x_p(n)$ с периодом $N \cdot T_d$ и частотами гармоник $k \cdot f_d/N$, совпадающими с бинами ДПФ,

- амплитуды гармоник определяются как $A_m(\omega_k) = \frac{2}{N} \cdot |X(j \cdot \omega_k)|$,
- фазы – $\varphi(\omega_k) = \arctg[X_{Im}(j \cdot \omega_k) / X_{Re}(j \cdot \omega_k)]$,
- средние мощности как $2 \cdot \left| \frac{1}{N} \cdot X(j \cdot \omega_k) \right|^2$.

Для детерминированного сигнала конечной длительности $N \cdot T_d$ аналогичным образом находятся амплитуды, фазы и мощности k -й частотной выборки спектра сигнала, а спектральная плотность сигнала на частотах ω_k определяется как $T_d \cdot X(j \cdot \omega_k)$. Другие спектральные характеристики такого сигнала связаны с его ДПФ соотношениями:



- $S_x(k) = |T_d \cdot X(j \cdot \omega_k)|^2$ – спектральная плотность энергии на частоте ω_k ;
- $P_x(k) = (T_d/N) \cdot |X(j \cdot \omega_k)|^2$ – спектральная плотность мощности на частоте ω_k ;
- $S_x = \frac{1}{N \cdot T_d} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} S_x(k)$, $P_x = \frac{1}{N \cdot T_d} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} P_x(k)$ – полная энергия и средняя мощность сигнала.

2.2. Функции Simulink для выполнения анализа спектра сигналов

В программе **Simulink** можно производить анализ спектра методом ДПФ (дискретного преобразования Фурье). При этом возможно анализировать спектры **только непериодических сигналов** по конечным наборам отсчетов.

Для анализа спектра периодических сигналов более целесообразно использовать функции классического языка **MATLAB**. Однако в этом случае моделирование спектра напоминает работу в программе **Mathcad**. В данной лабораторной работе анализ спектра периодических сигналов не рассматривается, поскольку был подробно рассмотрен в **лабораторной работе №2 «Спектральный анализ в пакете программ Mathcad»**.

Работа в программе **MATLAB** осуществляется с помощью симулятора работы виртуального прибора **Simulink**. Запуск пакета **Simulink** можно произвести из командного окна

MATLAB, нажав пиктограмму  в панели инструментов и открыв новую модель (пиктограмма ).

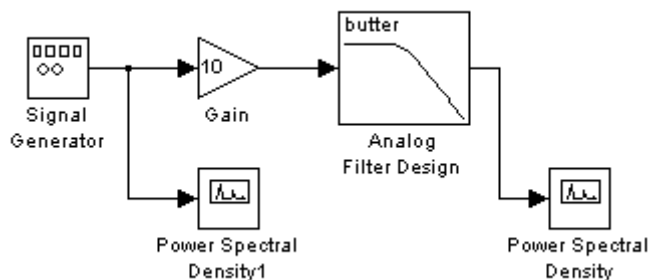
При запуске **Simulink** открываются два окна: пустое окно **untitled** (окно для создания блок–диаграммы модели) и окно **Library Simulink** (библиотека) с перечнем основных разделов библиотеки.

В открывшееся окно **untitled** необходимо добавить блоки, моделирующие работу источников сигналов, измерительных приборов и аналоговых систем.

Для изменения **параметров блоков** необходимо выполнить двойной щелчок на пиктограмму блока. При этом должно открыться окно настройки параметров **Block Parameters**.

2.2.1 Создание модели фильтра

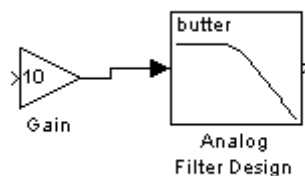
Для проведения спектрального анализа аналогового фильтра требуется составить следующую структурную схему (модель), [рис. 5](#).



[Рис. 5](#). Структурная схема для проведения спектрального анализа фильтра

Модель аналогового фильтра (в данной работе исследуется фильтр Баттерворта) выглядит так, как показано на [рис. 6](#), и создается с помощью следующих блоков:

- аналоговый фильтр с единичным усилением **Analog Filter Design** (DSP blockset/Filtering/Filter Design/Analog Filter Design), [рис. 7](#);
- усилитель **Gain** (Simulink/Math/Gain), [рис. 8](#).



[Рис. 6](#). Модель фильтра Баттерворта в программе MATLAB

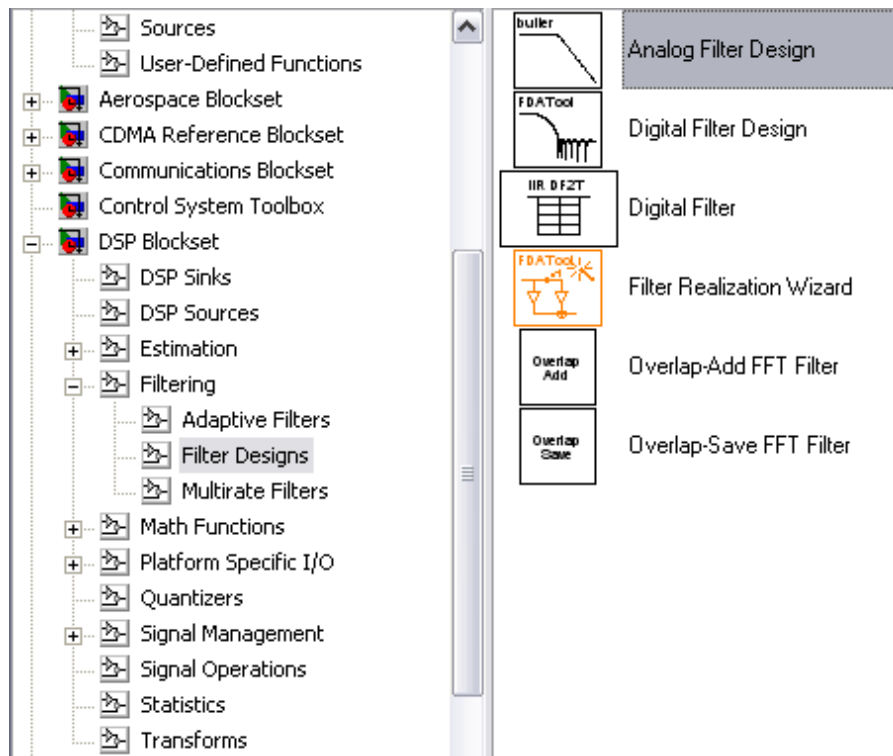


Рис. 7. Расположение блока **Analog Filter Design**

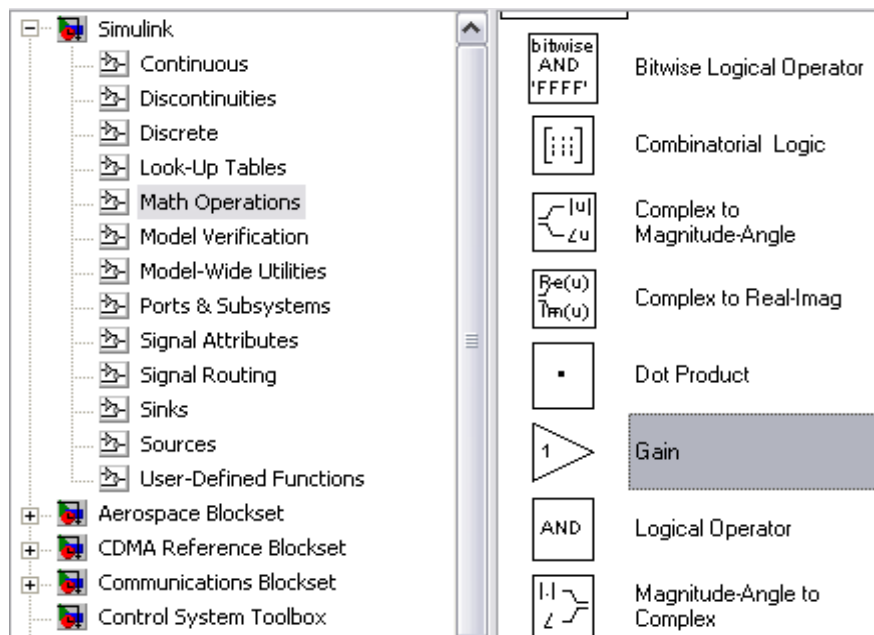


Рис. 8. Расположение блока усилителя **Gain**

Исходные данные необходимые для синтеза аналогового фильтра:

- вид аппроксимации;
- порядок фильтра N ;
- пульсации в полосе пропускания / заграждения (не требуется для фильтров Баттерворта);
- коэффициент усиления K .

Исходные данные задаются в блоке параметров фильтра **Block Parameters: Analog Filter Design** (рис. 9), где:

- **Design method** – вид аппроксимации;
- **Filter order** – порядок фильтра.

Коэффициент усиления задается отдельно в блоке параметров усилителя **Block Parameters: Gain** (рис. 10).

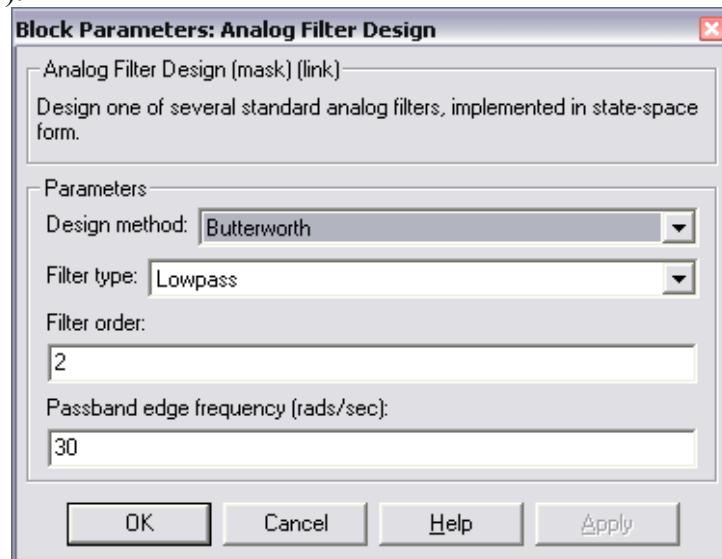


Рис. 9. Блок параметров Analog Filter Design

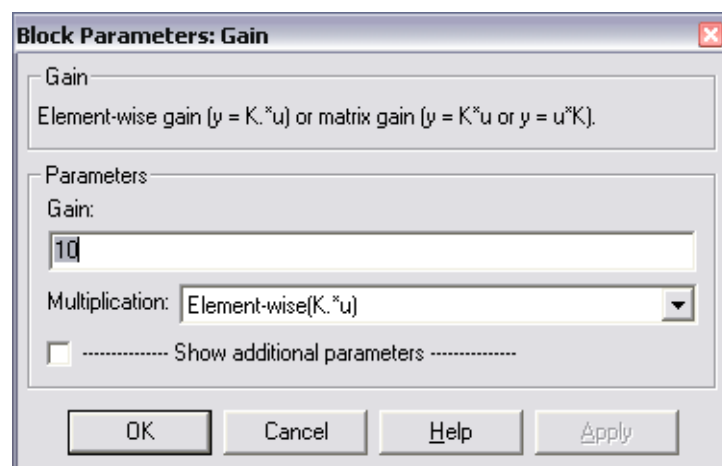


Рис. 10. Окно настройки параметров блока Gain

2.2.2. Блок Power Spectral Density (анализатор спектра)

Для просмотра спектральной плотности сигнала используют анализаторы спектра **Power Spectral Density (Simulink Extras/Additional Sinks/Power Spectral Density)**, рис.11.

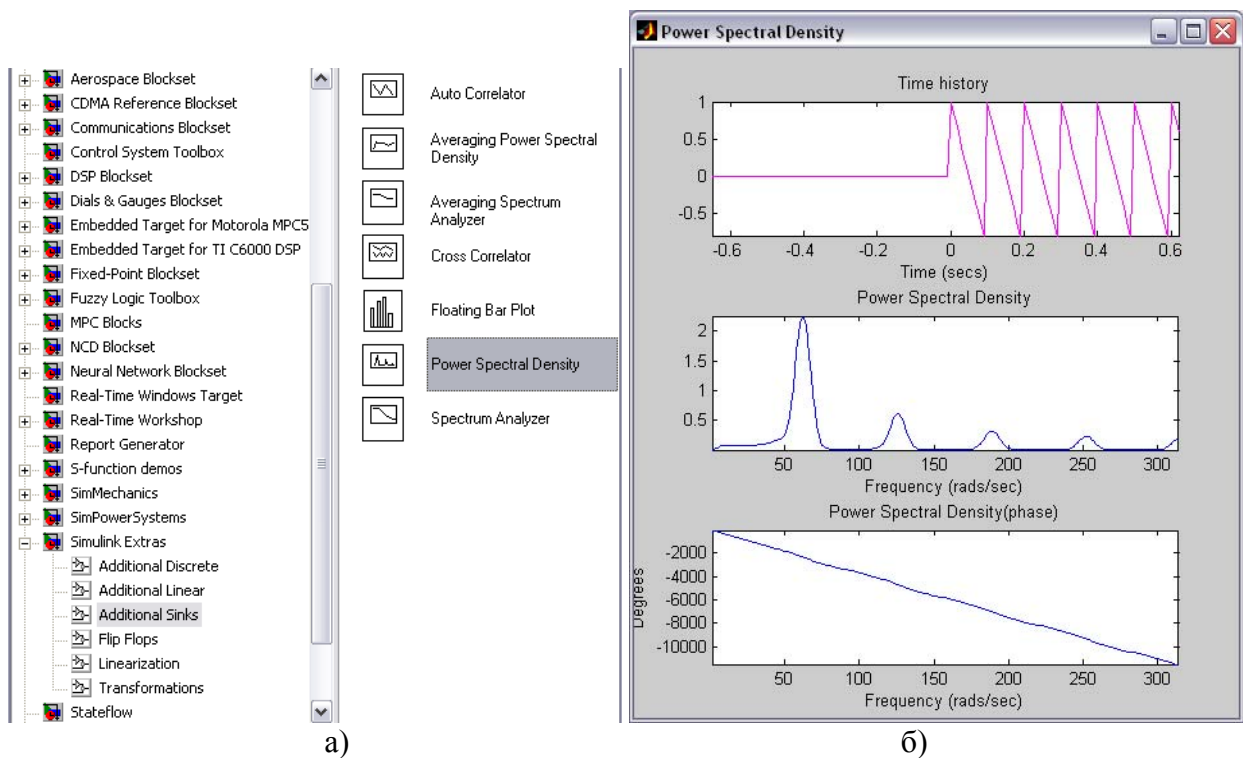


Рис. 11. Расположение блока **Power Spectral Density** (а) и результаты анализа спектра (б)

В окне настройки **Block Parameters: Power Spectral Density**, рис. 12, задаются следующие параметры анализатора спектра:

- **Length of buffer** – длина буфера (по умолчанию 128);
- **Number of points for fft** – число анализируемых точек (по умолчанию 512);
- **Plot after how many points**– количество точек, после которого производится построение графика (по умолчанию 64);
- **Sample time** – период дискретизации.

Все параметры, кроме периода дискретизации, должны быть кратны 2^N , где N – целое число.

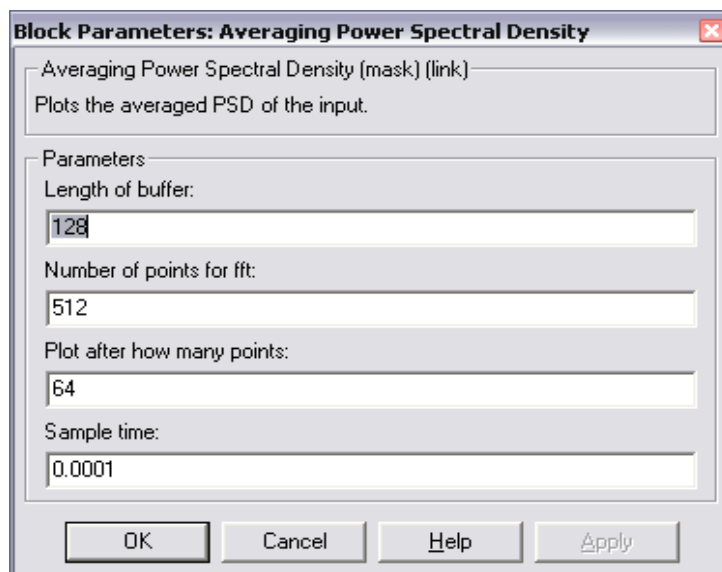



Рис. 12. Окно настройки параметров блока **Power Spectral Density**

Результаты анализа спектра, выполняемого блоком **Power Spectral Density**, представляются в трех окнах (рис. 11.6):

- исследуемый сигнал (**Time history**);
- амплитудный спектр (**Power Spectral Density**);
- фазовый спектр (**Power Spectral Density (phase)**).

Чтобы просмотреть спектр сигнала нужно запустить работу модели. Это можно сделать, вызвав меню **Simulation** и нажав команду **Start**, либо нажав сочетание клавиш **Ctrl + T** или же щелкнув пиктограмму  – **Start simulation**.

2.2.3 Блок Signal Generator (генератор сигналов)

Для задания гармонического сигнала, используется блок **Signal Generator** (Simulink/ Sources/Signal Generator), рис. 13.

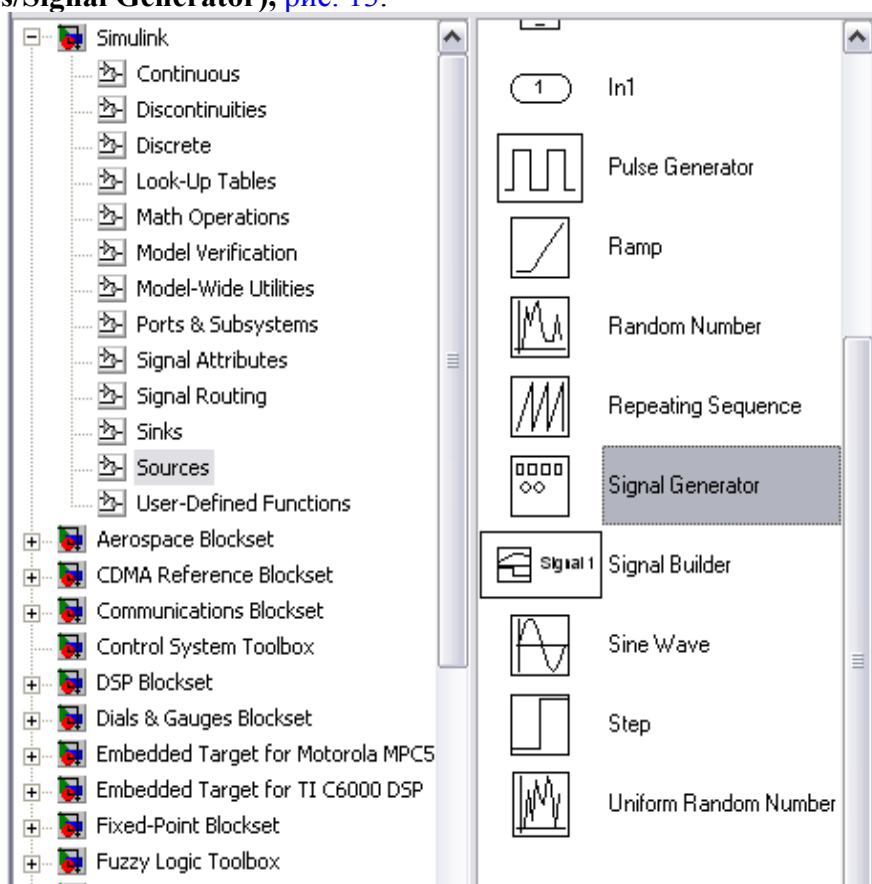


Рис. 13. Расположение блока **Signal Generator**

В окне настройки блока **Signal Generator** задаются следующие параметры:

- **Wave form** – форма сигнала:
 - **sine**– синусоидальный сигнал;
 - **square** – прямоугольный сигнал;
 - **saw tooth** – пилообразный сигнал;
 - **random** – случайный сигнал (шум);
- **Amplitude** и **Frequency** – амплитуда и частота сигнала;
- **Units** – единица измерения частоты (**Hertz** – Герцы или **rad/sec** – рад/сек).

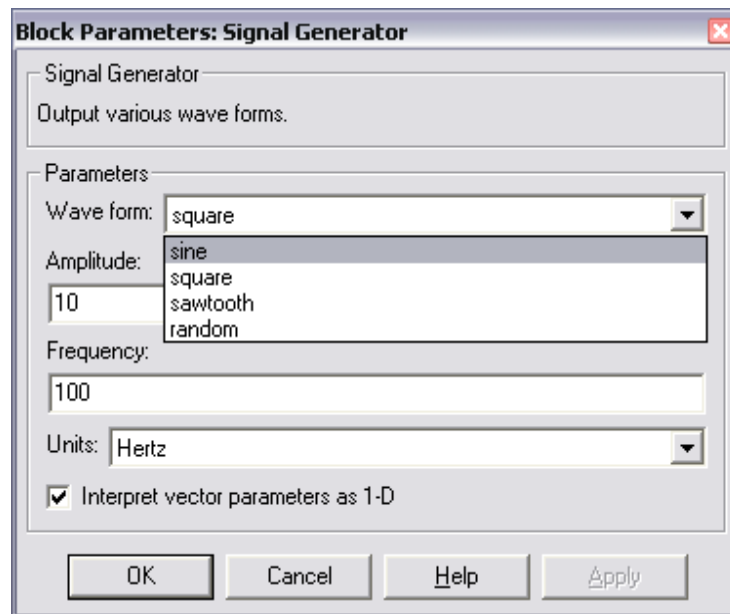


Рис. 14. Окно настройки параметров блока **Signal Generator**

2.2.4 Блок Sum (сумматор)

Для создания более сложных сигналов используется сумматор (**Simulink/ Math Operations/Sum**), рис. 15. Блок **Sum** выполняет суммирование входных сигналов. Пример использования сумматора для сложения двух входных сигналов показан на рис. 16.

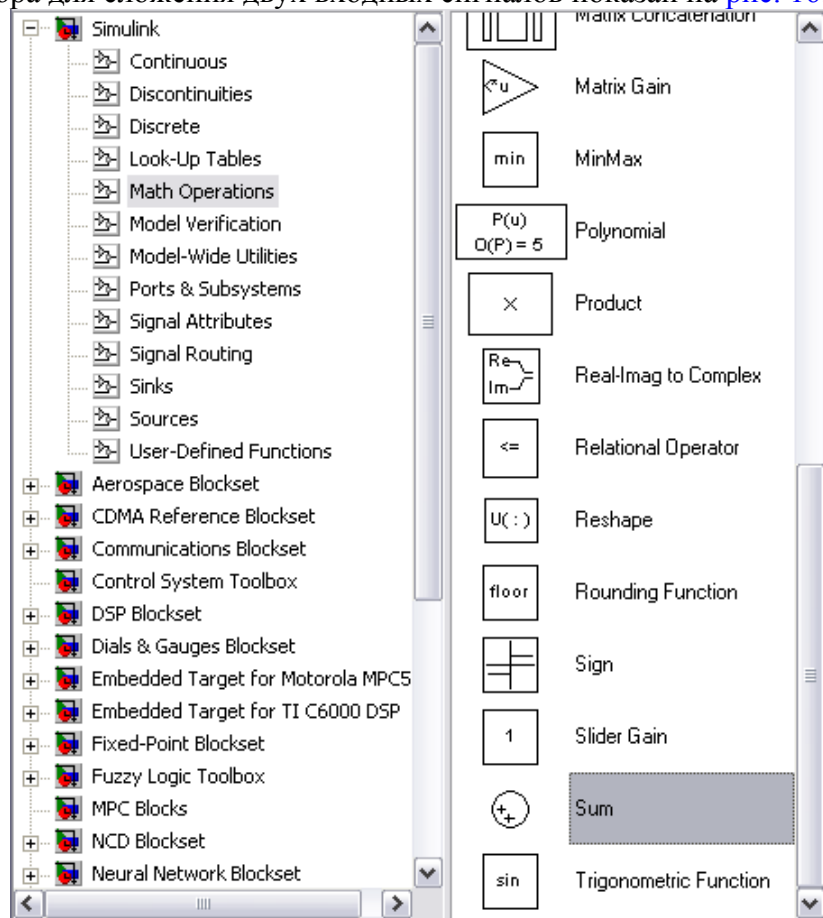


Рис. 15. Расположение блока **Sum**

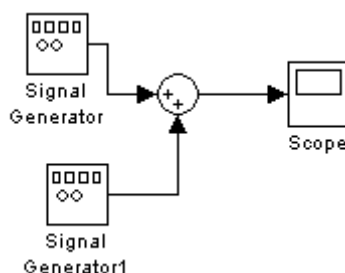


Рис. 16. Пример использования сумматора для сложения двух сигналов

Сумматор может использоваться в двух режимах:

- Сложение входных сигналов (в том числе с разными знаками);
- Суммирование элементов вектора, поступающих на вход блока.

Окно настройки параметров блока **Sum** изображено на рис. 18. Вводя значения в поле

List of signs (список знаков), можно управлять режимами работы блока **Sum**.

Значения могут задаваться одним из трех способов:

- в виде последовательности знаков «+» и «-», причем число знаков определяет число входов блока, а сами знаки – полярности соответствующих входных сигналов. При большом количестве слагаемых их целесообразно разбить на несколько групп, отделяя одну группу от другой символом | (например: ++ | -+);
- в виде целой положительной константы (больше 1), значение которой равно числу входов блока, а все входы считаются положительными (например, ввод константы 4 аналогичен вводу «списка знаков» в форме ++ ++).
- ввод значения 1 означает вычисление суммы элементов входного вектора (в этом случае внутри блока выводится символ ?).

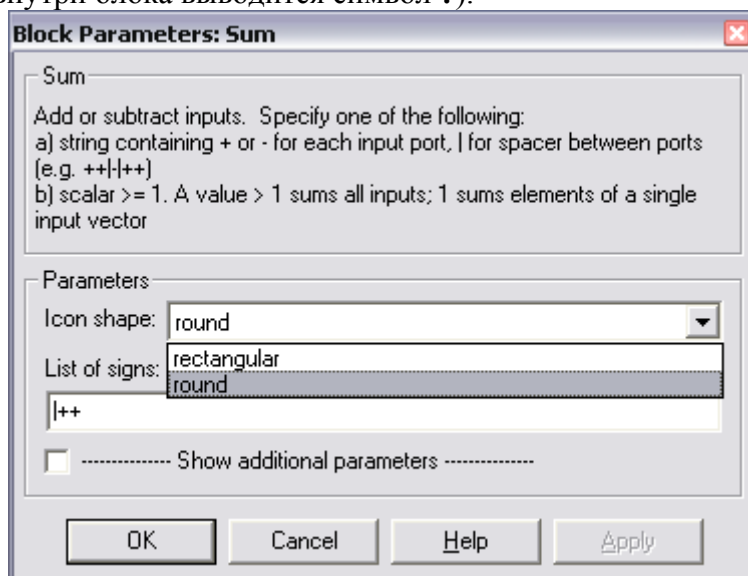


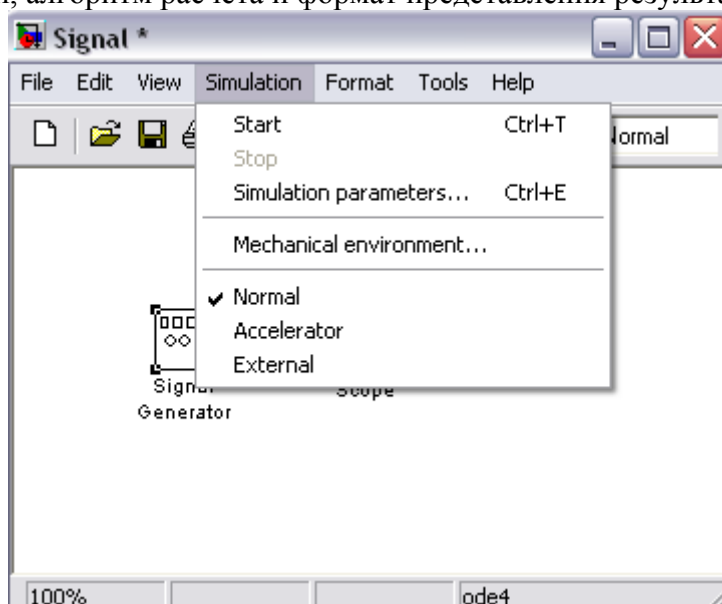
Рис. 17. Окно настройки параметров блока **Sum**

Два других параметра настройки блока имеют следующий смысл:

- раскрывающийся список **Icon shape** (форма значка) позволяет выбрать форму блока: **round** (окружность) или **rectangular** (прямоугольник);
- флажок **Show additional parameters** (показать дополнительные параметры) дает возможность задать необходимость «усечения» результата сложения, если он превышает диапазон, установленный для целочисленных значений.

2.3. Режимы моделирования систем в программе Simulink (меню Simulation)

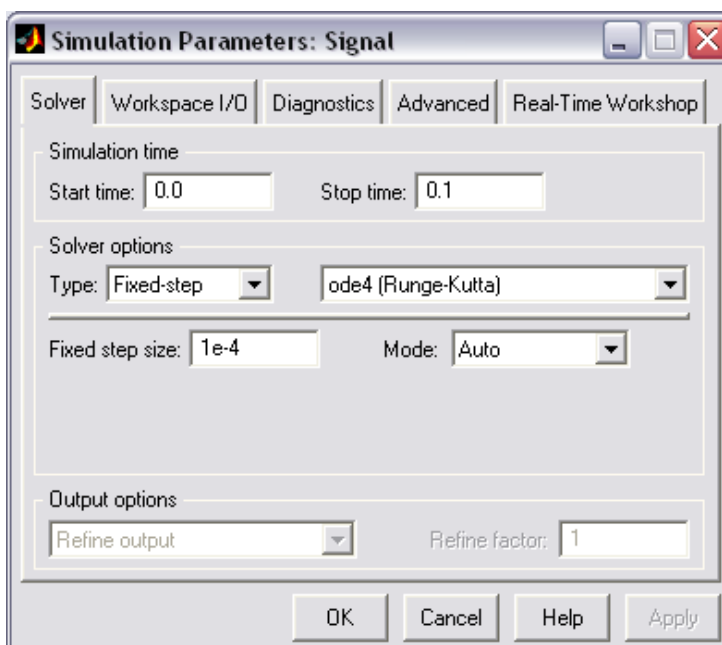
Посредством этих команд входящих в меню **Simulation** (моделирование), [рис. 18](#), разработчик получает возможность не только динамически управлять сеансом моделирования, но и изменять многие важнейшие параметры модели, такие, например, как способ изменения модельного времени, алгоритм расчета и формат представления результатов моделирования.



[Рис. 18](#). Меню **Simulation**

Элементы управления на вкладке **Solver** окна **Simulation Parameters** (параметры моделирования), [рис. 19](#), собраны в три группы.

Simulation time (интервал моделирования) – выбор интервала моделирования посредством указания начального (**Start time**) и конечного (**Stop time**) значений модельного времени.



[Рис. 19](#). Окно установки параметров моделирования

Solver options (параметры расчета) – выбор метода реализации (расчета) модели.

Output options (параметры вывода) – параметры вывода выходных параметров моделируемой системы (при моделировании с переменным шагом).

Под выбором метода реализации модели имеется в виду следующее. Имея структуру исследуемой системы в виде блок–диаграммы, разработчик может выбрать метод отображения хода моделирования. С помощью двух раскладывающихся списков **Type** (тип) система может быть реализована в следующих формах:

- с дискретными состояниями и дискретным временем перехода из одного состояния в другое;
- с дискретными состояниями и непрерывным временем перехода;
- с непрерывными состояниями и дискретным временем переходов;
- с непрерывными состояниями и непрерывным временем переходов.

Первый список (слева) позволяет выбрать способ изменения модельного времени:

- **Variable – step** (переменный шаг) – моделирование с переменным шагом;
- **Fixed – step** (фиксированный шаг) – моделирование с фиксированным шагом.

Второй список (справа) позволяет выбрать метод расчета нового состояния системы. Первый вариант (**discrete**) обеспечивает расчет дискретных состояний системы. Остальные пункты списка обеспечивают выбор метода расчета нового состояния для непрерывных систем. Эти методы различаются для переменного (**Variable – step**) и для фиксированного (**Fixed – step**) шага времени, но основаны на единой методике – решение обыкновенных дифференциальных уравнений(**ode**).

Ниже двух раскрывающихся списков **Type** находится поле, название которого изменяется в зависимости от выбранного способа изменения модельного времени.

Параметры других вкладок используются по умолчанию.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

При выполнении лабораторной работы используется программа MATLAB версии 6.0 и выше.

4. ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 4.1 Изучить методы моделирования оптимальных аналоговых фильтров в пакете программ MATLAB.
- 4.2 Изучить функций MATLAB Simulink для анализа спектра сигналов.
- 4.3 Исследовать изменение спектра сигналов при их прохождении через аналоговые фильтры.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Выражение для вычисления ДПФ. Условие неискаженного восстановления сигнала по его ДПФ.
- 5.2. Вычисление обратного ДПФ (ОДПФ). Вычисление ОДПФ с использованием ДПФ.
- 5.3. Анализатор спектра по методу ДПФ. Использование весовых функций.
- 5.4. Каким образом производится масштабирование амплитудного спектра при анализе методом ДПФ.
- 5.5. Каким образом задается период дискретизации блока анализатора спектра **Power Spectral Density**.

- 5.6. Какие результаты отображаются в окне анализатора спектра **Power Spectral Density**.
- 5.7. Каким образом задается фильтр Баттерворта в блоке **Analog Filter Design**.
- 5.8. Как задать интервал времени моделирования в программе **Simulink**.
- 5.9. Какие блоки программы **Simulink** используются для создания гармонических сигналов, ступенчатых воздействий, прямоугольных и треугольных импульсов.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1 Создать модель фильтра в программе **Simulink**.

Подготовить и ввести в программу исходные данные фильтра (п. 2.2.1) в соответствии с заданным вариантом (по номеру компьютера): аппроксимация – по Баттерворту; частота среза F_c ; коэффициент усиления K_0 ;

Вариант	1	2	3	4	5	6
F_c	100 Гц	200 Гц	300 Гц	400 Гц	500 Гц	600 Гц
K_0	10	20	30	40	50	60

6.2 Подать на вход фильтра сигнал с универсального генератора (п. 2.2.3).

6.3 К выходам генератора и фильтра подключить анализаторы спектра **Power Spectral Density** (п. 2.2.2).

6.4 Выполнить анализ изменения спектра сигналов фильтром для 4 форм сигналов:

- синусоидальный сигнал (SIN) с частотой $F_x = F_c$ (п. 2.2.3);
- прямоугольный сигнал (SQUARE) с частотой $F_x = F_c$ (п. 2.2.3);
- треугольный сигнал (SAWTOOTH) с $F_x = F_c$ (п. 2.2.3);
- синусоидальный сигнал (SIN) с частотой $F_x = F_c$ и шум (RANDOM) в полосе частот до $F_{ш} = 2 \cdot F_c$. Сигнал с шумом подается на вход через сумматор **Sum** (п. 2.2.4).

6.5 При моделировании следует выбрать следующие параметры в разделе **Simulation parameters** (п. 2.3): переменный шаг по времени (**Variable step**); алгоритм моделирования – **Domain Prince 45**; время моделирования – **Stop time** = 10 / F_x (10 периодов входного сигнала).

Для анализаторов спектра (**Power Spectral Density**) дополнительно указать параметр периода дискретизации **Sample time** = 1 / (10 · F_x) периода входного сигнала (п. 2.2.2).

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с.
2. Гульятеев А. К. MATLAB. Имитационное моделирование в среде Windows: учебное пособие. – СПб.: КОРОНА Принт, 1999. – 288 с.
3. Гульятеев А. К. Визуальное моделирование в среде MATLAB. Учеб. курс. – СПб.: Питер, 2000. – 480 с.
4. Иванов В.А. и др. Математические основы теории автоматического регулирования. Учеб. пособие для вузов. / Под ред. Чемоданова Б.К. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
5. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.