Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Цифрова обробка сигналів та зображень, сигнальні процесори»
для студентів спеціальності
172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
(G5 «Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»)
усіх форм навчання.

Проєктування цифрового БИХ-фільтра методом білінійного перетворення в пакеті програм MATLAB

2026

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Цифрова обробка сигналів та зображень, сигнальні процесори» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» (G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка») усіх форм навчання. Проєктування цифрового БИХ-фільтра методом білінійного перетворення в пакеті програм MATLAB. / Укл. М.П. Чорнобородов, А.В. Тіменко, Г.М. Сидоренко. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 34 с.

Укладачі: М.П. ЧОРНОБОРОДОВ, к.т.н., доцент
А.В. ТІМЕНКО, ст. викладач
Г.М. СИДОРЕНКО, зав. навч. лабораторії

Рецензент: С.С. САМОЙЛИК, к.ф-м. н., доцент

Відповідальний за випуск: А.В. ТІМЕНКО, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри РТТ
Протокол № 2 від 01.09.2026 р.

Затверджено
на засіданні НМК факультету ФІБЕК
Протокол № 2 від 25.09.2026 р.

ЗМІСТ

С.

Лабораторна робота №2. Проєктування цифрового бих-фільтра методом білінійного перетворення в пакеті програм MATLAB 4
1 Короткі пояснення до лабораторної роботи 4
1.1 Метод білінійного перетворення 4
1.2 Порядок синтезу РЦФ по аналоговому прототипу 7
1.3 Синтез аналогового ФНЧ-прототипу (АФПНЧ) 9
1.4 Перехід від АФПНЧ до ЦФ заданого типу 11
1.5 Функції Simulink для проектування цифрових БИХ-фільтрів методом білінійного перетворення 12
1.5.1 Створення моделі фільтра 13
1.5.2 Блок Gain (підсилювач) 17
1.5.3 Блок Signal Generator (універсальний генератор сигналів) . 18
1.5.4 Блок Zero-Order Hold (пристрій вибірки-зберігання, ПВЗ) . 20
1.5.5 Блок Step 22
2.5.6 Блок Scope (осцилограф) 23
1.6 Режими моделювання систем в програмі Simulink (меню Simulation) 25
2 Програмне забезпечення 29
3 Програма лабораторної роботи 30
4 Контрольні запитання 31
5 Порядок виконання лабораторного завдання 32
Перелік джерел посилань 34

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО БИХ-ФІЛЬТРА МЕТОДОМ БІЛІНІЙНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ПАКЕТІ ПРОГРАМ MATLAB
1 КОРОТКІ ПОЯСНЕННЯ ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Мета роботи: вивчення особливості синтезу БИХ-фільтрів методом білінійного перетворення в пакеті програм MATLAB; синтез цифрового фільтра методом білінійного перетворення; дослідження характеристик синтезованого цифрового фільтра.

1.1 Метод білінійного перетворення

Метод білінійного перетворення належить до аналітичних методів розрахунку цифрових фільтрів (ЦФ). Під час синтезу ЦФ за цим методом йому ставиться у відповідність аналоговий фільтр-прототип (АФП) з передавальною функцією H(s) і частотною характеристикою H(jΩ) [3]. Вони однозначно пов'язані з передавальною функцією H(z) і частотною характеристикою H(jω) цифрового фільтра. Відповідність між аналоговим фільтром-прототипом і цифровим фільтром:

– $H(s) \rightleftarrows H(z)$, де $s = f(z)$, $z = f^{-1}(s)$;

– $H(j\Omega) \rightleftarrows H(j\omega)$, де $\Omega = f(\omega)$, $\omega = f^{-1}(\Omega)$.

Зв'язок цей визначається прямий s=f (z) і зворотного z = f 1(s) перетворюють функціями і відповідними їм при $s = j\cdot\Omega$ та $z = e^{j\cdot\omega T_д}$ перетвореннями частот Ω = f (ω), ω = f 1(Ω) аналогового і цифрового фільтрів.

За допомогою цих перетворень визначаються вимоги до АФП, за якими добре розробленими методами синтезується його передавальна функція H(s), перетворюються потім в потрібну передавальну функцію ЦФ H(z) [3].

Білінійне перетворення, яке визначається наступним чином:

$$s = f(z) = (2/T)[(1 - z^{-1})/(1 + z^{-1})]. \quad (1.1)$$

Можна також знайти зворотне співвідношення:

$$z^{-1} = [(2 - s \cdot T)/(2 + s \cdot T)]. \quad (1.2)$$

З властивостей процедури переходу на основі білінійного перетворення слід, що уявна вісь S-площині відображається в одиничну окружність в Z-площині (де |z| = 1) (див. рис. 1.1).

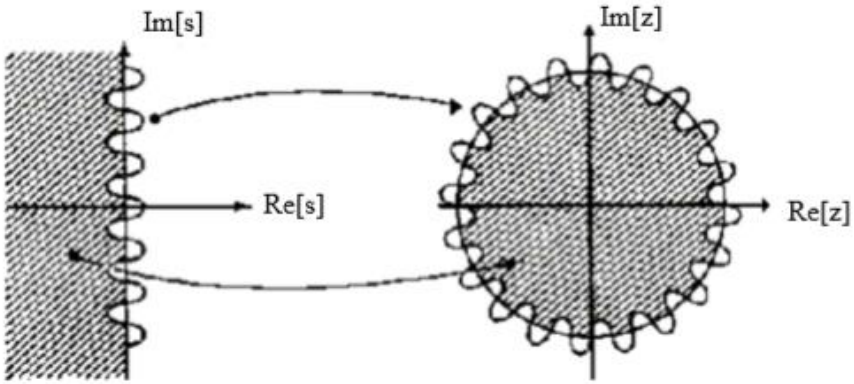


Рисунок 1.1 – Властивості процедури переходу
на основі білінійного перетворення

Білінійне перетворення – однозначна функція. Це означає, що кожній точці в Z-площині відповідає точно одна точка в s-площині і навпаки [5].

З цієї властивості однозначності слід, що **відсутній ефект накладення спектрів** при білінійній процедурі відображення. Методика розрахунку цифрових фільтрів на основі методу білінійного перетворення включає в себе знаходження відповідної передавальної функції H(s) аналогового фільтра і застосування до неї білінійного перетворення для отримання передавальної функції H(z) необхідного цифрового фільтра:

$$H(z) = H(s)|s = (2/T)(1 - z^{-1})/(1 + z^{-1}). \quad (1.3)$$

При цьому перетворенні будуть зберігатися і частотні характеристики, та властивості стійкості аналогового фільтра. Однак

це не означає, що частотні характеристики аналогового і цифрового фільтра ідентичні, однакова тільки їх «форма». Наприклад, якщо амплітудно-частотна характеристика аналогового фільтра монотонно спадає при 0 <Ω <∞, то відповідний цифровий фільтр, отриманий за допомогою співвідношення (1.3), буде мати монотонно спадає АЧХ при 0 <ω <∞ ,. Тобто, якщо АЧХ аналогового фільтра має k підйомів і спадів при 0 <Ω <∞, то і амплітудно-частотна характеристика відповідного цифрового фільтра буде мати k підйомами і спадами.

В результаті переходу до нормованих частотам ЦФ частотні перетворення приймають вид:

$$\Omega = \frac{2}{T} \cdot tg\left(\frac{\omega \cdot T}{2}\right). \qquad (1.4)$$

Характер деформації частот при білінійної перетворення показаний на рисунку 1.2.

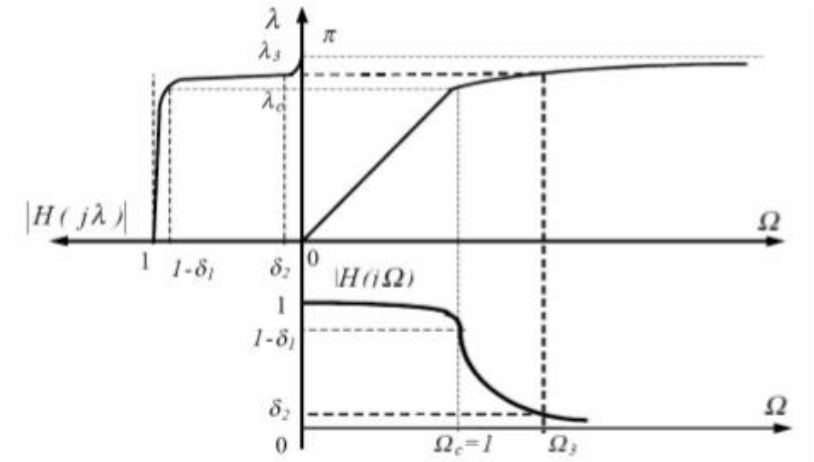


Рисунок 1.2 – Перетворення АЧХ аналогового ФНЧ
в АЧХ цифрового ФНЧ

Для забезпечення рівності ω_c = 1 рад/с необхідно деформувати частоту аналогового ФНЧ – прототипу: $\Omega_c = \frac{2}{T} \cdot tg\left(\frac{T}{2}\right)$.

Білінійне перетворення забезпечує просту процедуру переходу від аналогових до цифрових фільтрів і зберігає вид частотних характеристик при перетворенні. Це означає, що широкосмугові аналогові фільтри з крутої перехідною областю відображаються в широкосмугові цифрові фільтри без ефекту накладення. У цьому полягає основна перевага цього методу в порівнянні з методом інваріантності імпульсної характеристики. Недоліком білінійного перетворення є те, що нелінійність співвідношення між цифрової частотою ω і аналогової частотою Ω призводить до спотворення частотних характеристик аналогових фільтрів. Крім того, при цьому перетворенні не зберігається імпульсна характеристика.

1.2 Порядок синтезу РЦФ по аналоговому прототипу

Можливі два методи проєктування ЦФ по аналоговому прототипу.

У першому методі розрахунок аналогового фільтра-прототипу (АФП) починається з знаходження відповідного аналогового фільтра-прототипу низьких частот (АФПНЧ). Надалі використовується відповідне аналогове частотне перетворення для перекладу цього прототипу низьких частот в необхідний АФП. Нарешті, на основі процедури відображення цей аналоговий фільтр перетворюється в бажаний цифрової БИХ-фільтр (рекурсивний фільтр), який задовольняє висунутим вимогам. Повністю ця процедура розрахунку показана на рисунку 1.3 а.

Метод білінійного перетворення (через нелінійного співвідношення між цифрової частотою ω і аналогової частотою Ω) дає хороші результати тільки для тих частотних характеристик аналогового фільтра, які представляють собою ступенчатообразную функцію. Це означає, що процедура відображення (рис. 1.3 а) не забезпечує хороших методів розрахунку фільтрів верхніх частот, що загороджують і деяких типів смугових фільтрів.

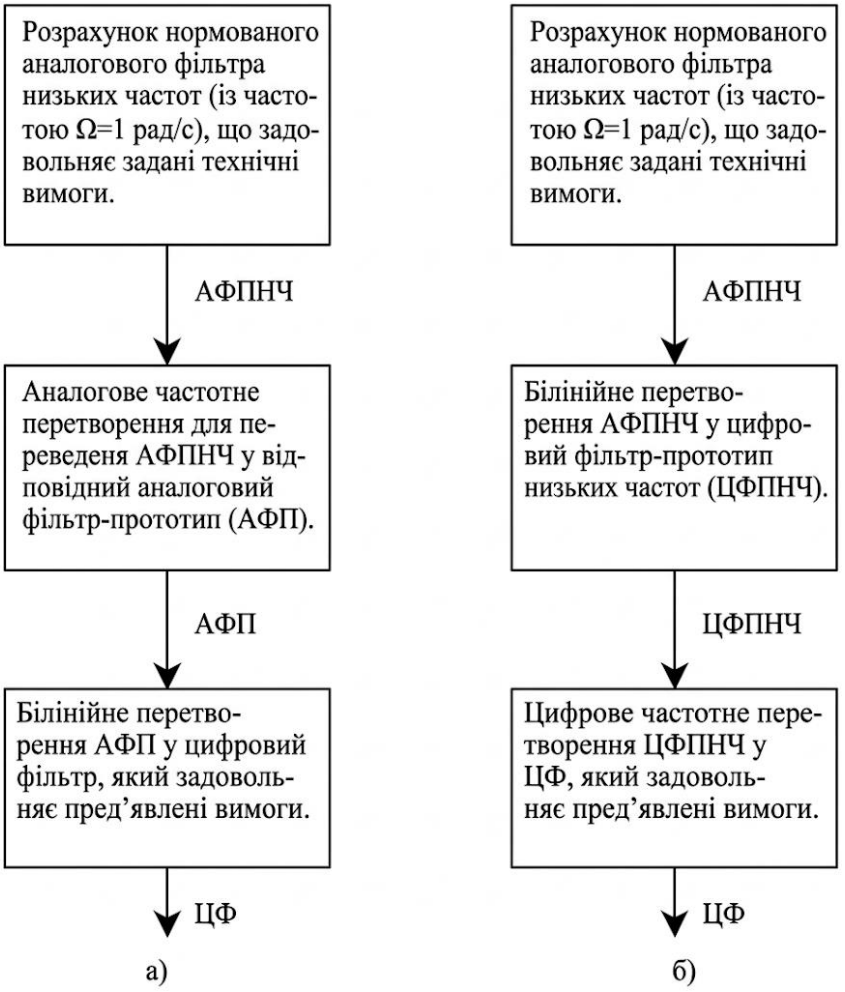


Рисунок 1.3 – Процедури розрахунку цифрових фільтрів

Для виключення цих недоліків використовується інший підхід до розрахунку цифрових БИХ-фільтрів. Такий спосіб зображений на рисунку 1.3 б. В цьому випадку процедура відображення завжди має справу з нормованим цифровим прототипом низьких частот. Даний підхід полягає в знаходженні відповідного нормованого аналогового

фільтра-прототипу низьких частот. Аналоговий прототип відображається в цифровий фільтр-прототип низьких частот (ЦФПНЧ). Нарешті, використовується цифрове частотне перетворення для переходу від цифрового прототипу низьких частот до остаточного варіанту, тобто цифрового фільтру з відповідними характеристиками в смузі пропускання і смузі затримування і задовольняє висунутим вимогам.

1.3 Синтез аналогового ФНЧ-прототипу (АФПНЧ)

Синтез АФПНЧ включає вибір апроксимуючої функції, визначення порядку фільтра m, значень нулів s_{0i} і полюсів s_{pi} і передавальної функції по заданих граничних частотах $\Omega_c = 1$, $\Omega_з$ і допускам на похибки апроксимації δ_1, δ_2 ($A_п$, $A_З$).

Нулі і полюси синтезованого АФПНЧ повністю визначають його передавальну функцію H(s):

$$H(s) = C \cdot \frac{\prod_{i=1}^{m1}(s-s_{0i})}{\prod_{i=1}^{m}(s-s_{pi})}, \qquad (1.5)$$

де C – нормуючий множник;

m_1 – число кінцевих нулів ($m_1 <$m).

Слід зазначити, що полюса АФПНЧ є речовими або комплексносопряженнимі числами (зі знаком мінус перед реальною частиною), а кінцеві нулі чисто уявними. Синтез АФПНЧ полягає в апроксимації його заданої ідеалізованої ЧХ за допомогою відповідних апроксимуючих функцій. Типові графіки частотних характеристик нормалізованого АФПНЧ з поліноміальної та дробової апроксимаціями наведені на рисунку 1.4.

Для частотних характеристик з рівнохвильовими пульсаціями на графіках вказані відповідні їм частоти нулів і полюсів Ω_{pi}, Ω_{0i} ПФ.

Фільтр Баттерворта

Апроксимація АФПНЧ Баттерворта має тільки полюса і забезпечує найбільш гладку АЧХ.

Порядок фільтра Баттерворта визначається по заданому ослаблення АЗ на деякій частоті $\Omega_З$.

$$n = \frac{\lg(A_3^2-1)}{2\cdot\lg(\Omega_3)}. \qquad (1.6)$$

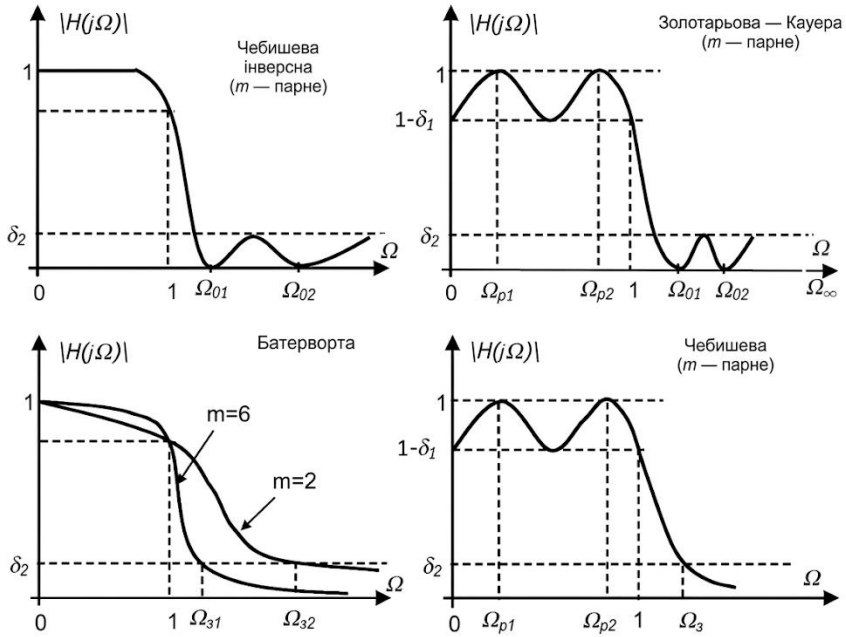


Рисунок 1.4 – Графіки частотних характеристик нормалізованого АФПНЧ, які відповідають різним апроксимуючої функції

Фільтр Чебишева 1

Апроксимація АФПНЧ Чебишева 1 також має тільки полюса і забезпечує найбільш швидкий перехід з смуги пропускання до смузі загородження при заданих викривлення в смузі пропускання.

Порядок фільтра Чебишева 1 визначається по заданому ослаблення A_3 на деякій частоті Ω_3 і пульсації в смузі пропускання ε.

$$n = \frac{lg\left(g+\sqrt{g^2-1}\right)}{lg(\Omega_3^2-1)}, g = \sqrt{\frac{A_3^2-1}{\varepsilon^2}}. \qquad (1.7)$$

Фільтр Чебишева 2 (інверсний).

Апроксимація АФПНЧ Чебишева 2 (інверсна) має не тільки полюса, але і нулі і забезпечує найбільш швидкий перехід з смуги пропускання до смузі загородження при заданих викривлення в смузі загородження.

Порядок фільтра Чебишева 2 також визначається по заданому ослаблення $A_З$ на деякій частоті $\Omega_З$ і пульсації в смузі пропускання (вираз 1.7).

1.4 Перехід від АФПНЧ до ЦФ заданого типу

Аналоговий фільтр-прототип низьких частот (АФПНЧ) перетвориться до необхідного аналоговому фільтру-прототипу (АФП) за допомогою наступних частотних перетворень:

– АФПНЧ-АФНЧ: $s \to \frac{S}{\Omega_u}$ (фільтр низьких частот);

– АФПНЧ-АФВЧ: $s \to \frac{\Omega_u}{S}$ (фільтр високих частот);

– АФПНЧ-АПФ: $s \to \frac{s^2+\Omega_u+\Omega_l}{s(\Omega_u-\Omega_l)}$ (смуговий фільтр);

– АФПНЧ-АРФ: $s \to \frac{s(\Omega_u-\Omega_l)}{s^2+(\Omega_u\Omega_l)}$ (режекторний фільтр),

де Ω_u – верхня частота зрізу;

Ω_l – нижня частота зрізу.

Отриманий АФП перетворюється в необхідний ЦФ за допомогою білінійного перетворення. АФПНЧ може бути перетворений в ЦФПНЧ шляхом білінійного перетворення. Далі виконуються частотні перетворення для отримання необхідного ЦФ:

– ЦФПНЧ-ЦФНЧ: $z^{-1} \to \frac{z^{-1}-\alpha}{1-\alpha\cdot z^{-1}}, \alpha = \frac{\sin(\frac{[\omega_C-\omega_u]}{2}\cdot T)}{\sin(\frac{[\omega_C+\omega_u]}{2}\cdot T)}$;

– ЦФПНЧ-ЦФВЧ: $z^{-1} \to -\frac{z^{-1}+\alpha}{1+\alpha\cdot z^{-1}}, \alpha = -\frac{cos(\frac{[\omega_C-\omega_u]}{2}\cdot T)}{\cos(\frac{[\omega_C+\omega_u]}{2}\cdot T)}$;

– ЦФПНЧ-ЦПФ: $z^{-1} \to \frac{z^{-2}-\left[\frac{2\cdot\alpha\cdot k}{k+1}\right]\cdot z^{-1}+\frac{k-1}{k+1}}{\frac{k-1}{k+1}\cdot z^{-2}-\left[\frac{2\cdot\alpha\cdot k}{k+1}\right]\cdot z^{-1}+1}$,

$$\alpha = \frac{\cos(\frac{[\omega_u+\omega_1]}{2}\cdot T)}{\cos(\frac{[\omega_u-\omega_1]}{2}\cdot T)},$$

$$k = ctg(\frac{[\omega_u-\omega_1]}{2}\cdot T)\cdot tg(\frac{\omega_c}{2}\cdot T);$$

– ЦФПНЧ-ЦРФ: $z^{-1} \to \frac{z^{-2}-\left[\frac{2\cdot\alpha}{k+1}\right]\cdot z^{-1}+\frac{1-k}{1+k}}{\frac{1-k}{1+k}\cdot z^{-2}-\left[\frac{2\cdot\alpha}{k+1}\right]\cdot z^{-1}+1}$,

$$\alpha = \frac{\cos(\frac{[\omega_u-\omega_1]}{2}\cdot T)}{\cos(\frac{[\omega_u+\omega_1]}{2}\cdot T)},$$

$$k = tg(\frac{[\omega_u-\omega_1]}{2}\cdot T)\cdot tg(\frac{\omega_0}{2}\cdot T),$$

де ω_u – верхня частота зрізу;
ω_l – нижня частота зрізу;
ω_0 – центральна частота ПФ і РФ;
ω_c – частота зрізу ЦФПНЧ;
T – період дискретизації.

1.5 Функції Simulink для проектування цифрових БИХ-фільтрів методом білінійного перетворення

Робота в програмі MATLAB здійснюється за допомогою симулятора роботи віртуального приладу Simulink [2]. Запуск пакета Simulink можна зробити з командного вікна MATLAB, натиснувши пентаграму  в панелі інструментів і відкривши нову модель (піктограма ).

При запуску Simulink відкриваються два вікна: пусте вікно untitled (вікно для створення блок-діаграми моделі) і вікно Library Simulink (бібліотека) з переліком основних розділів бібліотеки.

В відкрилося вікно untitled необхідно додати блоки, що моделюють роботу джерел сигналів, вимірювальних приладів і аналогових систем.

Для зміни параметрів блоків необхідно виконати подвійне клацання на піктограму блоку. При цьому має відкритися вікно настройки параметрів Block Parameters.

1.5.1 Створення моделі фільтра

Для моделювання роботи цифрового фільтра (ЦФ) складемо таку структурну схему (модель), рисунок 1.5.

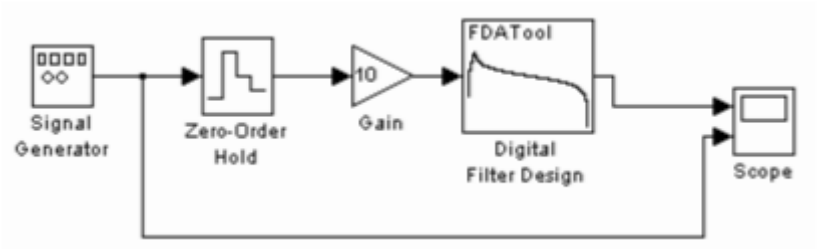


Рисунок 1.5 – Структурна схема для моделювання роботи цифрового фільтра

Модель цифрового фільтра створюється за допомогою блоку Digital Filter Design, рисунок 1.6 (DSP Blockset / Filtering / Filter Design / Digital Filter Design).

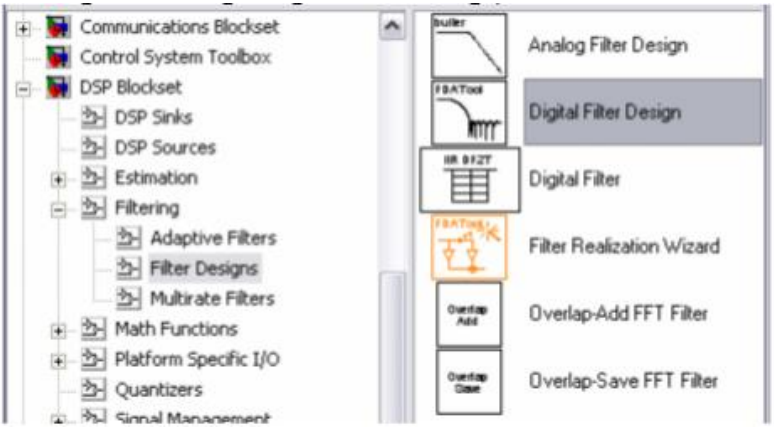


Рисунок 1.6 – Розташування блоку Digital Filter Design

Вихідні дані ЦФ задаються в блоці параметрів фільтра Block Parameteters: Digital Filter Design (рис. 1.7).

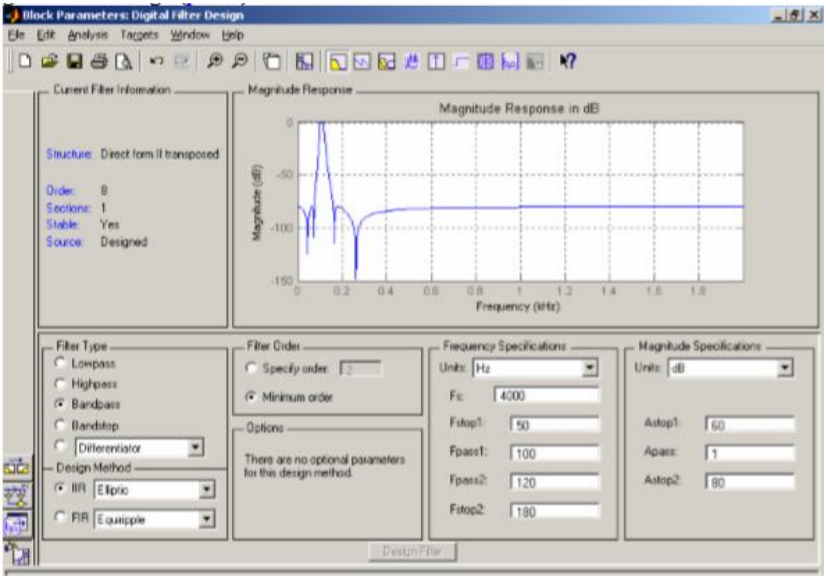


Рисунок 1.7 – Блок параметрів Digital Filter Design

У блоці параметрів цифрового фільтра елементи настройки зібрані в 6 груп [3]:

– Current Filter Information – відображається коротка інформація про синтезованих цифровому фільтрі (порядок – Order, стійкість – Stable / Unstable, кількість блоків – Sections, тип структури фільтра – Filter structure);

– Filter Type – задається тип фільтра:

а) Lowpass – ФНЧ;

б) Highpass – ФВЧ;

в) Bandpass – смуговий фільтр ПФ;

г) Bandstop – режекторний фільтр РФ;

д) Differentiator – дифференциатора;

е) а також інші типи фільтрів;

– Design Method – задається вид апроксимації:

а) IIR – БИХ-фільтри:

1) Butterworth – фільтр Баттерворта;

2) Chebyshev Type I – фільтр Чебишева 1 роду;

3) Chebyshev Type II – фільтр Чебишева 2 роду;

4) Elliptic – фільтр еліптичний (Золотарьова-Кауера);

б) FIR – КИХ-фільтри (опис режимів розрахунку наведено в методичних вказівках до лабораторної роботи №7 «Проєктування цифрового КИХ-фільтра в пакеті програм MATLAB»);

– Filter Order – задається порядок фільтра-прототипу (Specify order) або виставляється прапорець розрахунку мінімального порядку фільтра-прототипу (Minimum order);

– Frequency Specifications – задаються частотні параметри фільтру (кількість параметрів може змінюватися в залежності від обраного типу фільтра):

а) Units – одиниці виміру частоти (Hz – Гц, Normalized (0 to 1) – нормалізований фільтр (в відносних одиницях);

б) Fs – частота дискретизації;

в) Fstop1 – нижня частота смуги загородження (на якій забезпечується загасання Astop1, дБ);

г) Fpass1 – нижня частота смуги пропускання (на якій забезпечується загасання Apass, дБ);

д) Fpass2 – верхня частота смуги пропускання (на якій забезпечується загасання Apass, дБ);

е) Fstop2 – верхня частота смуги загородження (на якій забезпечується загасання Astop2, дБ);

– Magnitude Specifications – задаються коефіцієнти загасання фільтра:

а) Units – одиниці виміру коефіцієнта загасання (dB – дБ, Squared – відносні одиниці);

б) Apass, Epass – коефіцієнти загасання в смузі пропускання;

в) Astop, Estop – коефіцієнти загасання в смузі загородження.

Для управління параметрами відображення результатів розрахунку, графіків і виконання над ними різних дій блок параметрів Digital Filter Design має панель інструментів, що містить піктограми з наступними призначеннями:

–  створити новий блок налаштування параметрів ЦФ;

–  відкрити блок налаштування параметрів ЦФ;

–  зберігти налаштування блока параметрів ЦФ;

–  друк вмісту вікна;

–  вікно для попереднього просмотра перед друком вмісту вікна;

–  відмінити останню дію;

–  повернути на шаг назад;

–  збільшити вміст вікна;

–  зменшення вмісту вікна;

–  вивод у віддільному вікні **Filter Visualization Tool** параметрів синтезированного фильтра.

Вікно Filter Visualization Tool дозволяє візуально переглянути такі параметри фільтра, як:

–  АЧХ фільтра;

–  ФЧХ фільтра;

–  одночас в одному вікні та АЧХ і ФЧХ фільтра;

–  імпульсна характеристика;

–  реакція фільтра на ступеневий вплив (перехідна характеристика);

–  картина нулів і полюсів фільтра на комплексної Z-площині;

–  значення коефіцієнтів передавальної функції фільтра (Numerator – коефіцієнти чисельника, Denominator – коефіцієнти знаменника).

1.5.2 Блок Gain (підсилювач)

Оскільки блок Digital Filter Design дозволяє розраховувати тільки нормовані фільтри, тобто з одиничним посиленням в смузі пропускання, то для отримання коефіцієнтів передачі, що відрізняються від одиниці, необхідно використовувати додатковий блок підсилювача Gain (Simulink / Math / Gain), рисунок 1.8.

Коефіцієнт посилення задається у вікні налаштування параметрів Block Parameters: Gain (рис. 1.9).

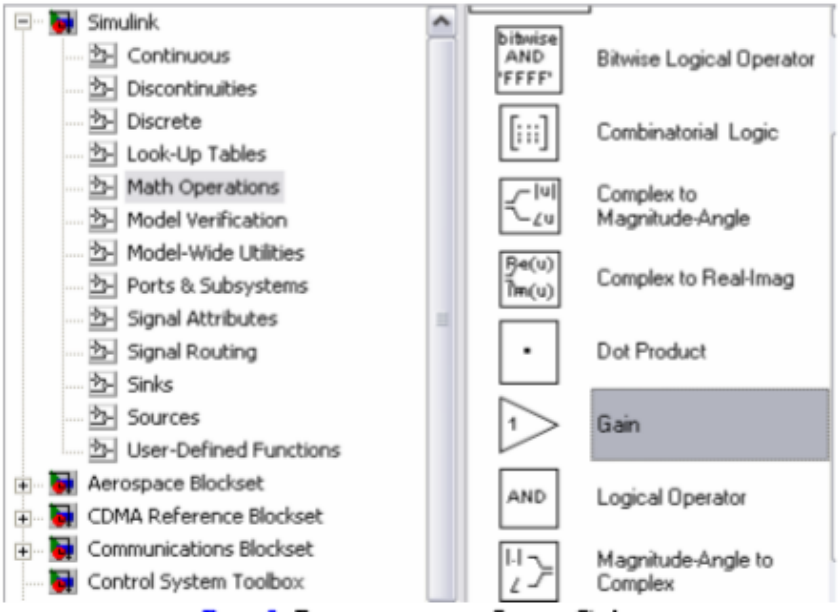


Рисунок 2.8 – Розташування блоку Gain

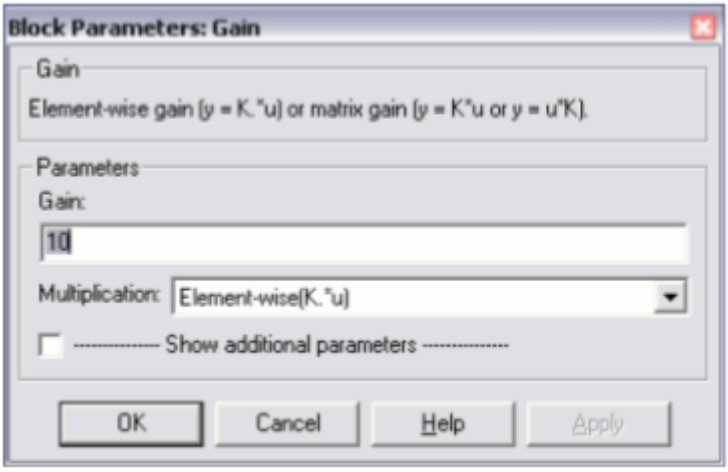


Рисунок 1.9 – Вікно налаштування параметрів блоку Gain

1.5.3 Блок Signal Generator (універсальний генератор сигналів)

Для того, щоб подати на вхід фільтра сигнал, використовуються універсальний генератор сигналів Signal Generator (Simulink / Sources / Signal Generator) [1], рисунок 1.10.

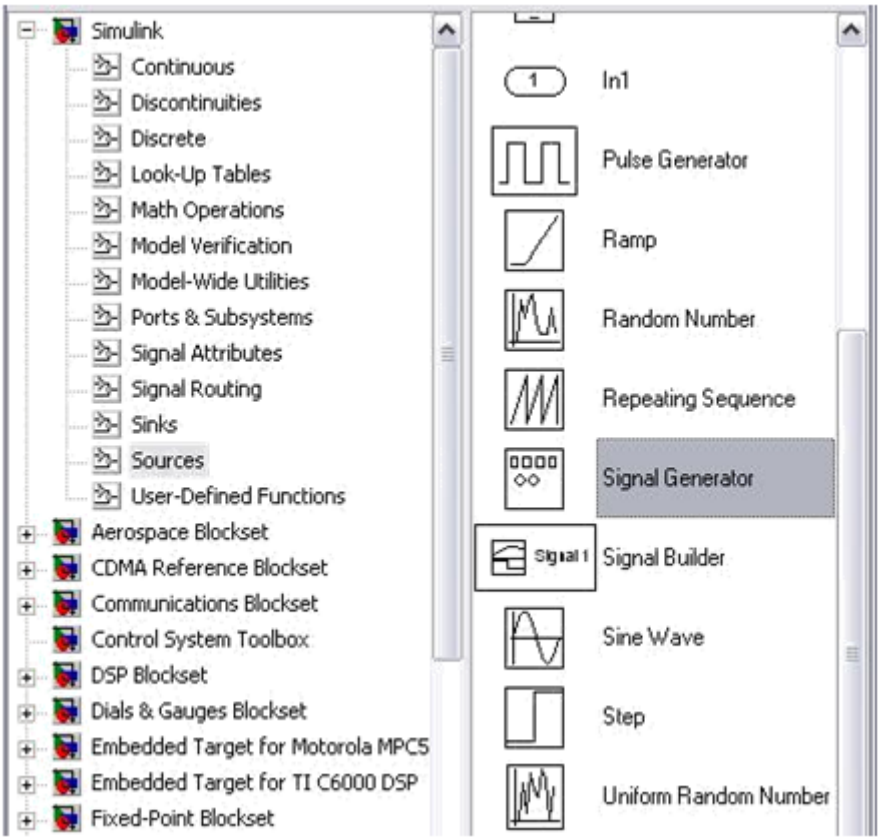


Рисунок 1.10 – Розташування блоку Signal Generator

У вікні настройки (рис. 1.11) блоку Signal Generator задаються наступні параметри:

– Wave form – форма сигналу:

а) sine – синусоїдальний сигнал;

б) square – прямокутний сигнал;

в) saw tooth – пилоподібний сигнал;

г) random – випадковий сигнал (шум);

– Amplitude і Frequency - амплітуда і частота сигналу;

– Units – одиниця виміру частоти (Hertz – Герци або rad / sec – рад / сек).

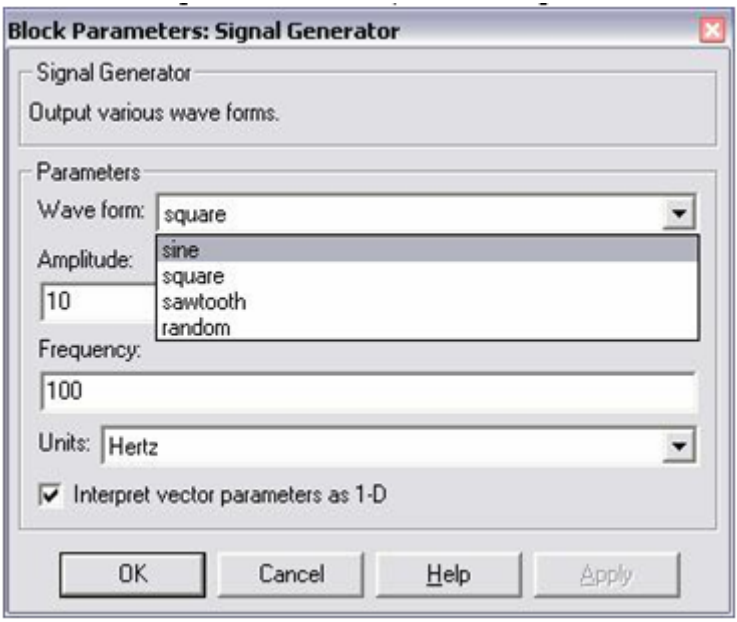


Рисунок 1.11 – Вікно налаштування параметрів блоку Signal Generator

1.5.4 Блок Zero-Order Hold (пристрій вибірки-зберігання, ПВЗ)

Щоб на вхід ЦФ подати цифровий сигнал, використовується ПВЗ, яке перетворює аналоговий сигнал з виходу генератора (Signal Generator) в дискретні відліки сигналу. Як ПВЗ використовується блок Zero-Order Hold (Simulink / Discrete / Zero-Order Hold), рисунок 1.12.

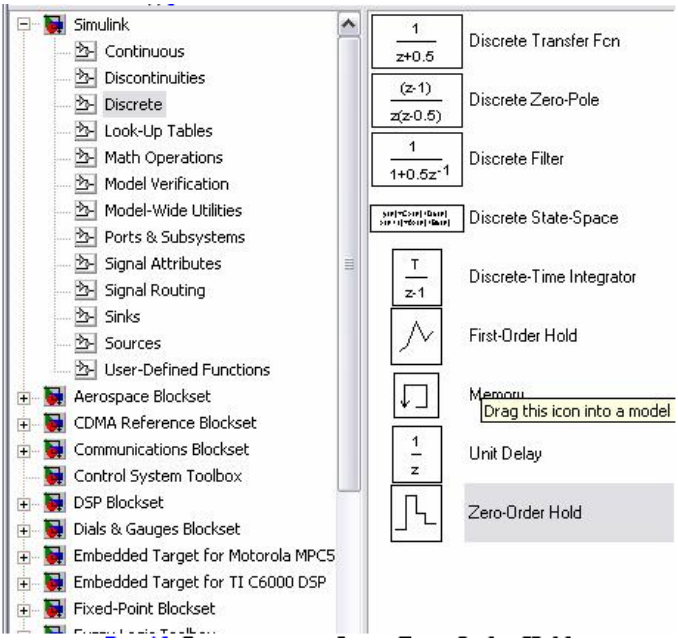


Рисунок 1.12 – Розташування блоку Zero-Order Hold

У вікні налаштування блоку Zero-Order Hold задається період дискретизації Sample time (рис. 1.13).

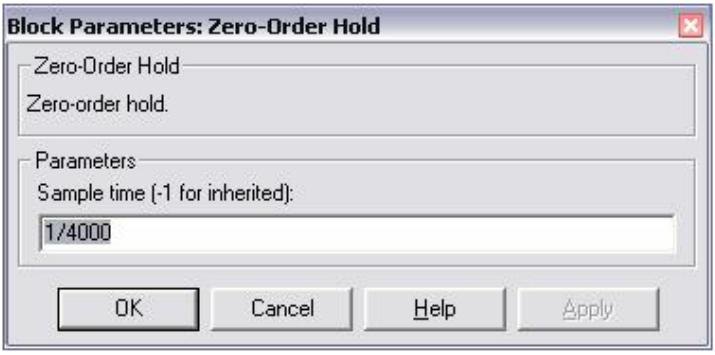
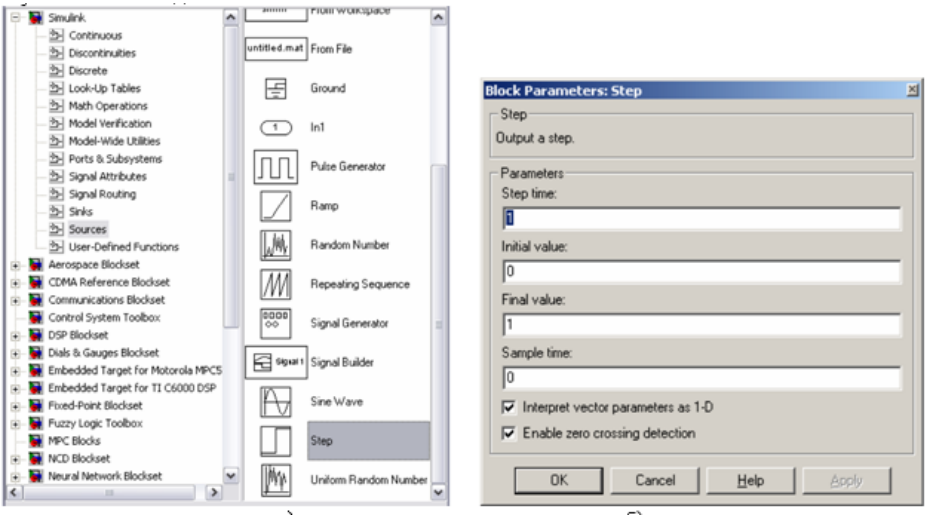


Рисунок 1.13 – Вікно налаштування параметрів блоку Zero-Order Hold

У прикладі, що зображено на рисунку 2.13, період дискретизації визначається по необхідній частоті дискретизації, тобто 4000 Гц. Слід пам'ятати, що частота дискретизації, виставлена в блоці Zero-Order Hold, повинна дорівнювати частоті дискретизації Fs, зазначеної при розрахунку цифрового фільтра (п. 1.5.1).

1.5.5 Блок Step

Блок Step (Simulink / Sources / Step), рисунок 1.14 а, використовується для відтворення ступеневої впливу.



а) б)

а – блок Step; б – вікно налаштування параметрів

Рисунок 1.14 – Розташування блоку Step та вікно налаштування його параметрів

При відкритті вікна налаштування параметрів сигналу, рисунок 1.14.б, в графі Step time задається час початку ступеневої впливу, в графах Initial value і Final value – початкове і кінцеве значення амплітуди ступеневої впливу, в графі Sample time – період

дискретизації вихідного сигналу (якщо період дорівнює нулю, то сигнал вважається безперервним).

Щоб знайти відгук фільтра на одиничне поетапне вплив (перехідну характеристику), потрібно скласти таку структурну схему (рисунок 1.15).

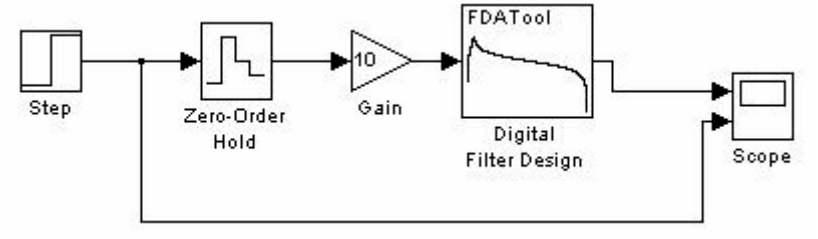


Рисунок 1.15 – Структурна схема для визначення перехідної характеристики фільтра

2.5.6 Блок Scope (осцилограф)

Для візуального перегляду сигналів використовують блоки, які при моделюванні відіграють роль оглядових вікон; до них також відноситься блок Scope (осцилограф) (Simulink / Sinks / Scope), рисунок 1.16.

Блок Scope має один вхід і дозволяє в процесі моделювання спостерігати цікавлять користувача процеси. Основним параметром осцилографа є кількість входів (тобто кількість відображуваних сигналів, або у вікні може відображатися до 30 сигналів). Залежно від кількості сигналів осцилограф може мати кілька екранів. Екран осцилографа з двома входами виглядає так, як зображено на рисунку 1.17 (піктограма виглядає так 

).

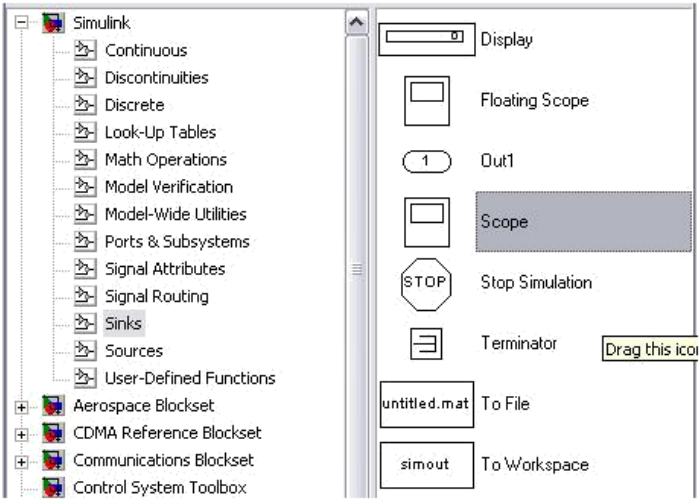


Рисунок 1.16 – Розташування блоку Scope

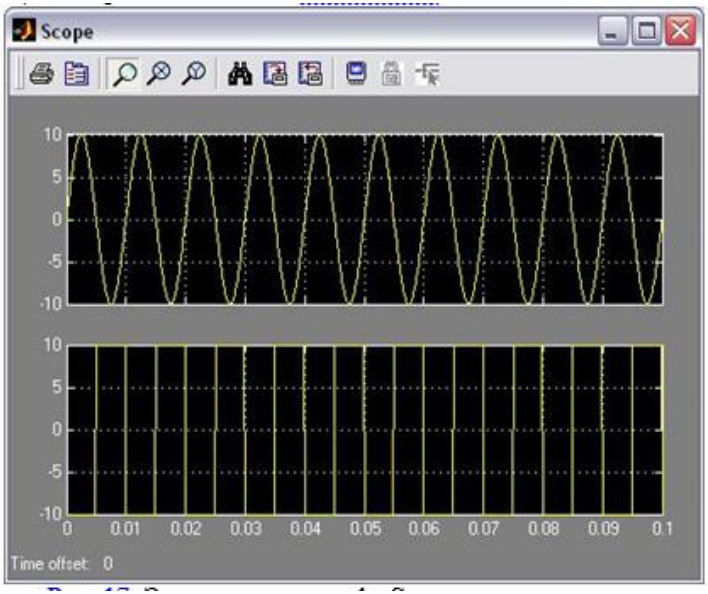


Рисунок 1.17 – Екран осцилографа Scope з двома входами

Натискання піктограми  призводить до появи вікна настройки параметрів Scope (Scope parameters), рисунок 1.18.

У графі Number of axes задається кількість входів осцилографа, Time range – верхня межа часу, що відображається на осі абсцис, Tick labels – відображення вісей координат (all – всі вісі, none – немає вісей, bottom axis only – тільки горизонтальна вісь). Рекомендується використовувати налаштування, виставлені за замовчуванням.

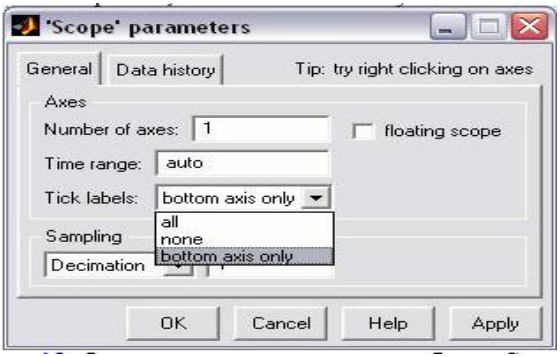


Рисунок 1.18 – Вікно налаштування параметрів блоку Scope

1.6 Режими моделювання систем в програмі Simulink (меню Simulation)

Не дивлячись на те, що меню Simulation (моделювання) містить всього кілька команд (рис. 1.19), саме вони відіграють основну роль при проведенні досліджень моделі. За допомогою цих команд розробник отримує можливість не тільки динамічно управляти сеансом моделювання, а й змінювати багато найважливіші параметри моделі, такі, наприклад, як спосіб зміни модельного часу, алгоритм розрахунку і формат представлення результатів моделювання.



Рисунок 1.19 – Меню Simulation

Розглянемо докладніше засоби управління моделлю і параметрами сеансу моделювання, які надає досліднику вікно Simulation Parameters (параметри моделювання), рисунок 1.20. Елементи управління на вкладці Solver зібрані в три групи.

Simulation time (інтервал моделювання) – вибір інтервалу моделювання за допомогою вказівки початкового (Start time) і кінцевого (Stop time) значень модельного часу.

Solver options (параметри розрахунку) – вибір методу реалізації (розрахунку) моделі. Output options (параметри виведення) – параметри виведення вихідних параметрів модельованої системи (при моделюванні зі змінним кроком).

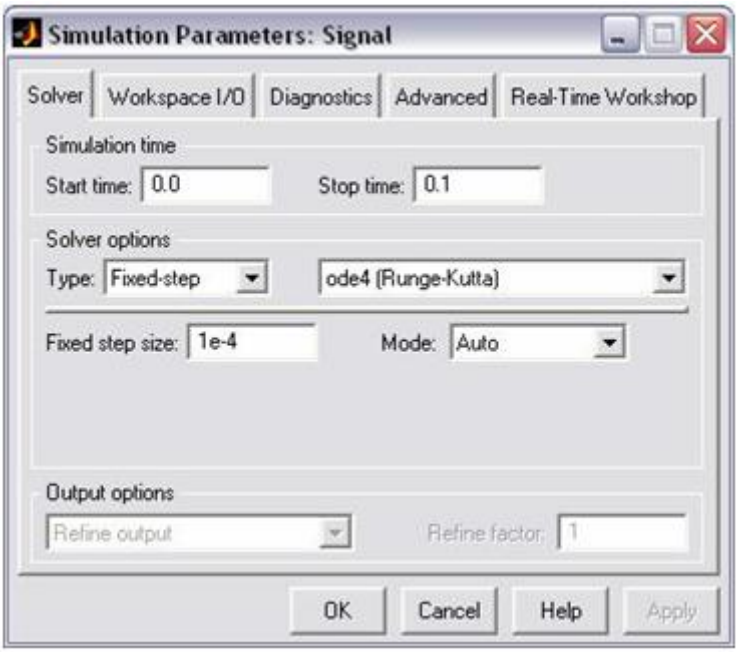


Рисунок 1.20 – Вікно установки параметрів моделювання

Під вибором методу реалізації моделі мається на увазі наступне. Маючи структуру досліджуваної системи у вигляді блок-діаграми, розробник може вибрати метод відображення ходу моделювання. За допомогою двох розкладних списків Type (Тип) система може бути реалізована в наступних формах:

– з дискретними станами та дискретним часом переходу з одного стану в інший;

– з дискретними станами і безперервним часом переходу;

– з безперервними станами і дискретним часом переходів;

– з безперервними станами і безперервним часом переходів.

Перший список (ліворуч) дозволяє вибрати спосіб зміни модельного часу:

– Variable – step (змінний крок) – моделювання зі змінним кроком;

– Fixed – step (фіксований крок) – моделювання з фіксованим кроком.

Другий список (праворуч) дозволяє вибрати метод розрахунку нового стану системи. Перший варіант (discrete) забезпечує розрахунок дискретних станів системи. Інші пункти списку забезпечують вибір методу розрахунку нового стану для безперервних систем. Ці методи розрізняються для змінного (Variable-step) і для фіксованого (Fixed - step) кроку часу, але засновані на єдиній методиці – рішення звичайних диференціальних рівнянь (ode).

Нижче двох списків, що розкриваються Type знаходиться поле, назва якого змінюється в залежності від обраного способу зміни модельного часу (рекомендується залишити параметри за замовчуванням).

Параметри інших вкладок також можна використовувати за умовчанням.

2 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

При виконанні лабораторної роботи використовується програма MATLAB версії 6.0 і вище.

3 ПРОГРАМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

1. Вивчити особливості синтезу БИХ-фільтра методом білінійної перетворення в пакеті програм MATLAB.

2. Виконати синтез БИХ-фільтра, проаналізувати розташування полюсів і нулів фільтра на комплексної Z-площині, розрахувати коефіцієнти передавальної функції ЦФ, перевірити відповідність АЧХ заданим вимогам.

3. Знайти перехідну характеристику фільтра.

4. Знайти відгуки фільтра на гармонійні сигнали в смузі пропускання і смузі затримування, оцінити виборчі властивості фільтра.

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке імпульсна характеристика і передавальна функція ЦФ?
2. Що таке порядок ЦФ і як позначається його значення при реалізації фільтра?
3. Що таке нулі і полюси передавальної функції ЦФ?
4. Як визначити стійкість ЦФ за значеннями його нулів і полюсів?
5. Що таке білінійна перетворююча функція? Як перетворюються частоти аналогового і цифрового фільтрів при білінійному перетворенні?
6. Як визначаються вимоги до аналогового фільтру-прототипу в методі білінійного перетворення?
7. Які особливості апроксимуючих функцій, що використовуються при синтезі ЦФ? Як залежить порядок синтезованого ЦФ від виду апроксимуючої функції?
8. Які параметри фільтру дозволяють візуально переглянути вікно Filter Visualization Tool блоку параметрів Digital Filter Design?
9. Для чого використовується блок Gain при моделюванні роботи ЦФ?
10. Яке призначення блоку Zero-Order Hold при моделюванні роботи ЦФ?
11. Яким чином задається період дискретизації блоку Zero-Order Hold і чому він повинен бути рівний?
12. Які параметри необхідно встановити, щоб на виході блоку Step отримати безперервний / дискретний поетапний вплив?

5 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАВДАННЯ

1. Створити модель фільтра (п. 1.5.1) в програмі Simulink.

Підготувати і ввести в програму вихідні дані (п. 1.5.1) відповідно до заданого варіантом (за номером комп'ютера), необхідні для синтезу цифрового ФНЧ: апроксимація – по Чебишеву 1 (п. 1.7.2); частота зрізу Fc; коефіцієнт посилення K0; порядок фільтра-прототипу N = 2, пульсації в смузі пропускання – 1дБ.

Варіант	1	2	3	4	5	6
F_c	100 Гц	200 Гц	300 Гц	400 Гц	500 Гц	600 Гц
K0	10	20	30	40	50	60

Частоту дискретизації встановити рівний 4 кГц.

2. Провести синтез фільтра. Переглянути та проаналізувати наступні параметри фільтра: розташування полюсів і нулів фільтра на Z-площині, коефіцієнти передавальної функції, АЧХ.

3. Порівняти результати розрахунку фільтра з параметрами, отриманими при синтезі аналогічного ЦФ в програмі Mathcad (лабораторна робота №5 «Проектування цифрового фільтра методом білінійної перетворення в пакеті програм Mathcad»).

4. Подати на вхід ЦФ одиничне поетапне вплив (п. 1.5.5) і обчислити перехідну характеристику системи.

Порівняти отримані результати з даними, отриманими при синтезі аналогічного ЦФ в програмі Mathcad.

5. Подати на вхід ЦФ гармонійний сигнал (п. 1.5.3) з частотою Fx рівній частоті зрізу фільтра Fc і одиничною амплітудою. Побудувати графіки вхідного і вихідного сигналу. Оцінити виборчі властивості фільтра.

Порівняти результати з даними, отриманими при моделюванні системи в програмі Mathcad.

6. Повторити п. 5 для гармонійного сигналу з частотою Fx = 2·Fc.

7. Повторити пункти 1-6 для цифрового смугового фільтра (ПФ) з апроксимацією Баттерворта 2 порядки: центральна частота смуги

пропускання Fc; коефіцієнт посилення K0, смуга пропускання $\Delta F = 0.1 \cdot Fc$.

Варіант	1	2	3	4	5	6
F_c	100 Гц	200 Гц	300 Гц	400 Гц	500 Гц	600 Гц
K0	10	20	30	40	50	60

Частоту дискретизації встановити рівний 4 кГц.

8. Повторити пункти 1-6 для цифрового режекторного фільтра (РФ) з апроксимацією Баттерворта 2 порядку: центральна частота смуги загородження Fc; коефіцієнт посилення K0, смуга загородження $\Delta F = 0.1 \cdot Fc$.

Варіант	1	2	3	4	5	6
F_c	100 Гц	200 Гц	300 Гц	400 Гц	500 Гц	600 Гц
K0	10	20	30	40	50	60

Частоту дискретизації встановити рівний 4 кГц.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Proakis, J. G., & Salehi, M. *Digital Communications* (5th ed.). McGraw-Hill Education. 2007 p.

2. Sklar, B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Prentice Hall. 2001 p.

3. Поповський, В. В. (Ред.). *Телекомунікаційні системи передавання інформації*. Харків: ХНУРЕ. 2014 р.

4. Офіційна документація MathWorks : Communications Toolbox. Опис функцій awgn, biterr.

5. Стеклов, В. К., & Беркман, Л. Н. *Телекомунікаційні мережі*. Київ : Техніка. 2006 р.