

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Загальні принципи моделювання систем зв'язку в Simulink та оцінки їх завадостійкості

Мета роботи - знайомство із середовищем Simulink. Побудова найпростішої системи цифрового зв'язку та оцінка її стійкості до перешкод. Формування спектра сигналу та прийом сигналів з лінійною модуляцією. Дослідження впливу мультиплікативного скремблювання на ймовірність помилки.

Вказівки до виконання роботи

1. Запуск Simulink та створення порожньої моделі.

Запустіть програму **Simulink**. Клацніть на панелі інструментів на кнопці **Simulink Library** (рис. 1).

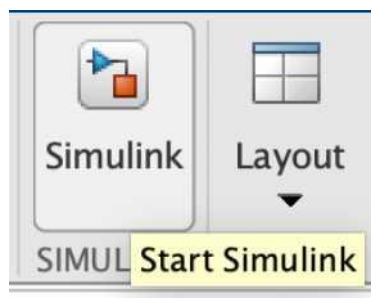


Рис. 1 Simulink на панелі інструментів

Або введіть у командному рядку **MATLAB** команду "simulink" (рис. 2).



Рис. 2- Введення команди «simulink» у командному рядку

Відкриється стартове вікно **Simulink (Simulink Start Page)** (рис. 3).

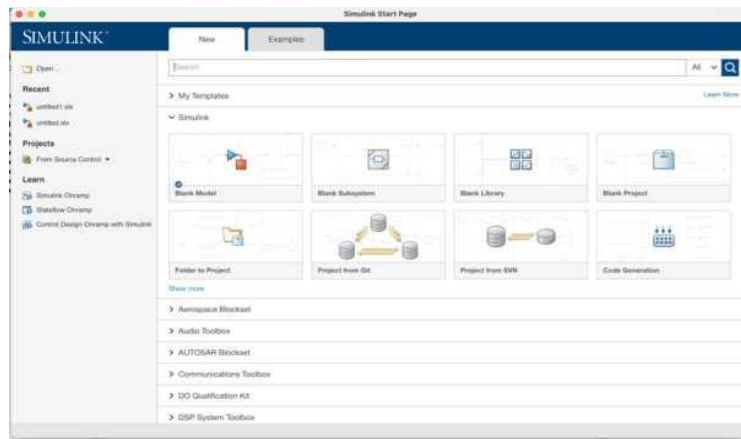


Рис. 3 Стартове вікно Simulink

Клацніть у вікні **Simulink Start Page** на шаблоні **Blank Model** (малюнок 4).

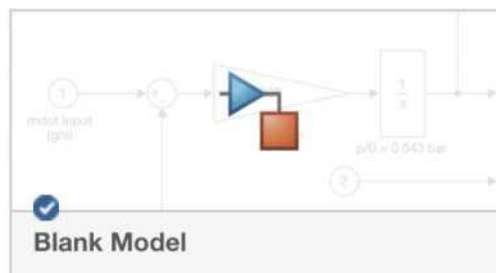


Рис. 4 – Шаблон **Blank Model**

Відобразиться порожнє вікно нової моделі (рис. 5).

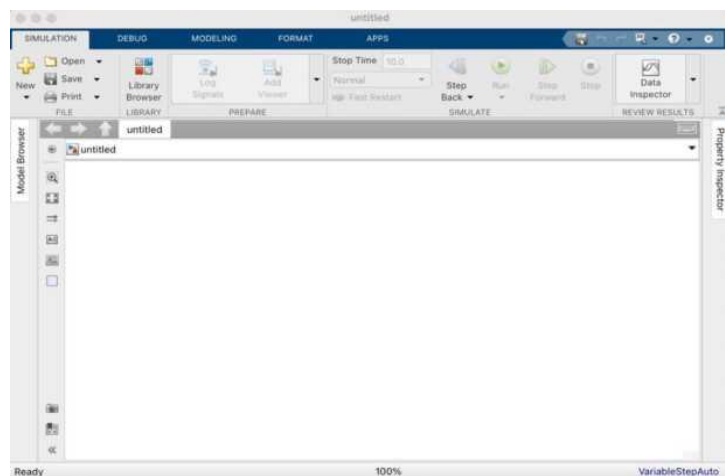


Рис. 5 Порожнє вікно нової моделі Simulink

Клацніть у вікні моделі за кнопкою **Library Browser** (рис. 6).

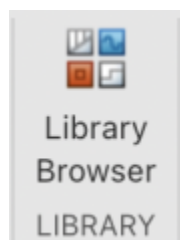


Рис. 6 Кнопка Library Browser

Відобразиться вікно бібліотеки блоків **Simulink** (рис. 7).

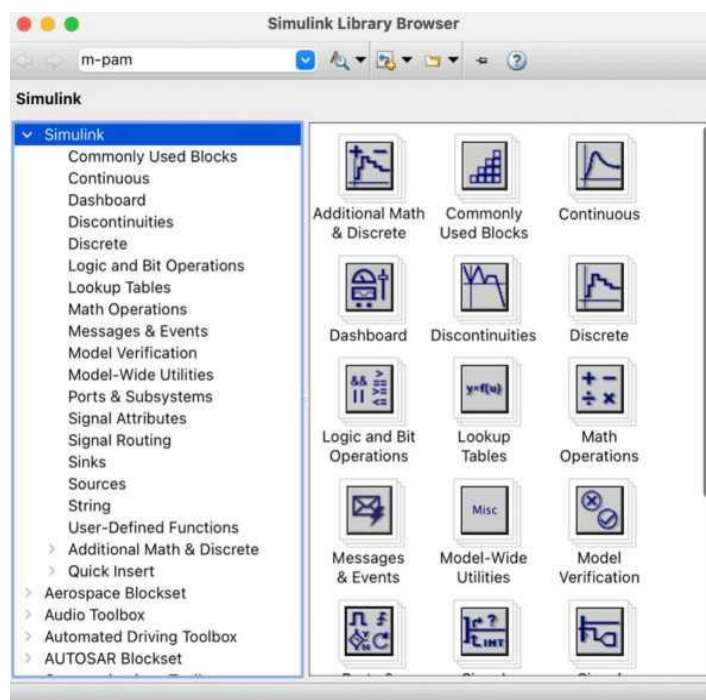
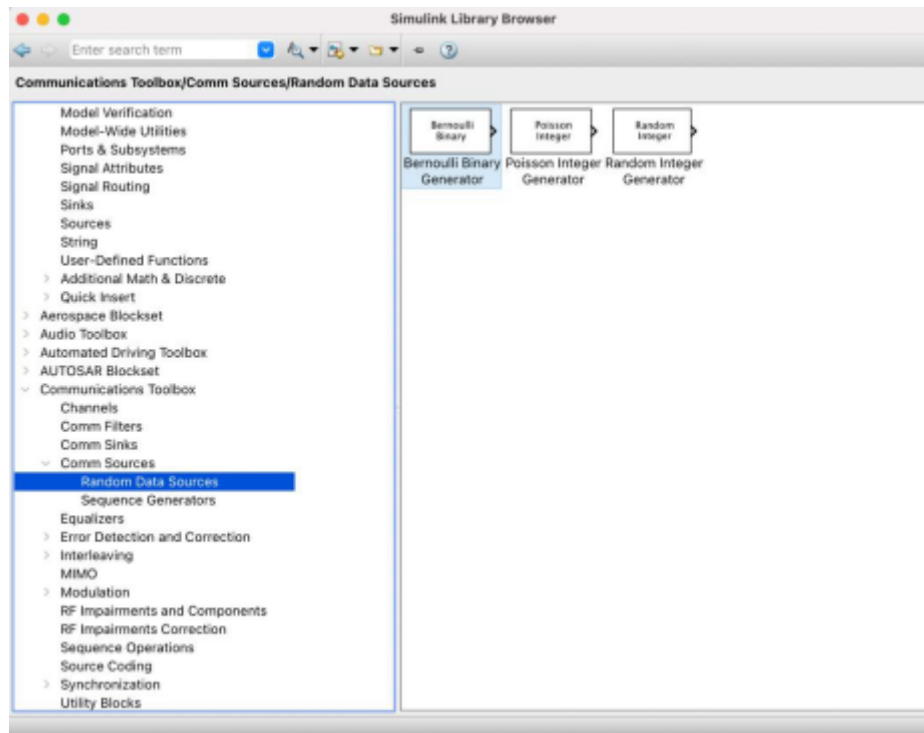


Рис. 7 Вікно бібліотеки блоків Simulink

2. Побудова моделі найпростішої системи зв'язку.

Будь-яка система зв'язку починається із джерела інформації, а закінчується її одержувачем. Як джерело зручно використовувати псевдовипадковий некорельований бітовий потік (блок **Communications Toolbox** $\Rightarrow$ **Comm Sources** $\Rightarrow$ **Random Data Sources** $\Rightarrow$ **Bernoulli Binary Generator**) (рис. 8).



Метою моделювання системи зв'язку найчастіше є оцінка її завадостійкості, тобто. вимір ймовірності помилки. У зв'язку з цим одержувачем буде блок, призначений для такого вимірювання, – **Communications Toolbox $\Rightarrow$ Comm Sinks $\Rightarrow$ Error Rate Calculation** (рис. 9).

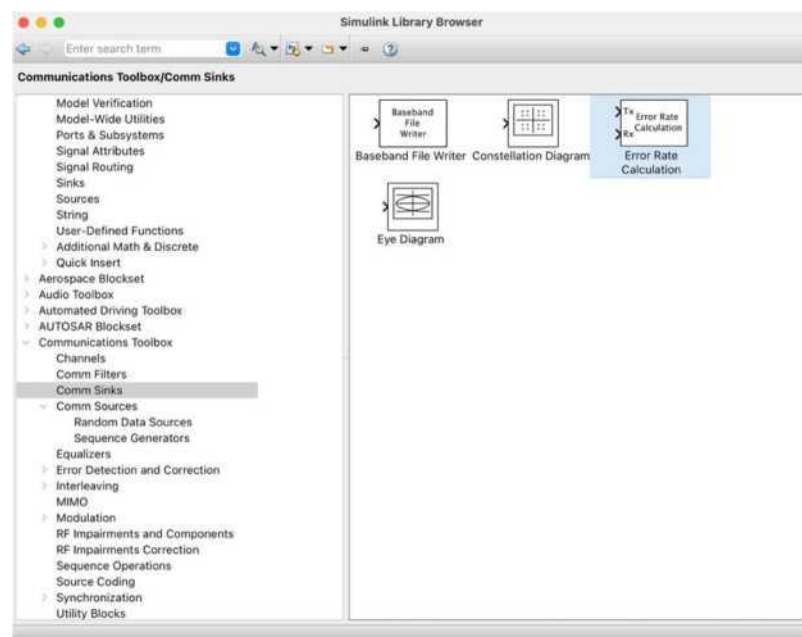


Рис. 9 Error Rate Calculation у бібліотеці блоків Simulink

Розмістіть зазначені блоки у складі моделі, перетягуючи їх з допомогою миші (рис. 10)

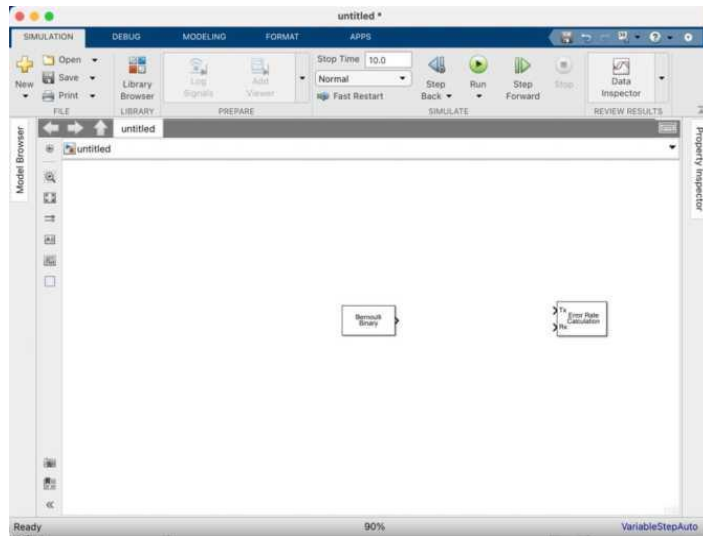


Рис. 10 Склад моделі із блоками з бібліотеки Simulink

Для візуальної демонстрації результатів виміру ймовірності бітової помилки (**BER**) необхідно зробити так, щоб вони виводилися у вигляді вихідного сигналу блоку **Error Rate Calculation**. Для цього необхідно налаштувати параметри блоку (**Block Parameters**) (рис. 11).

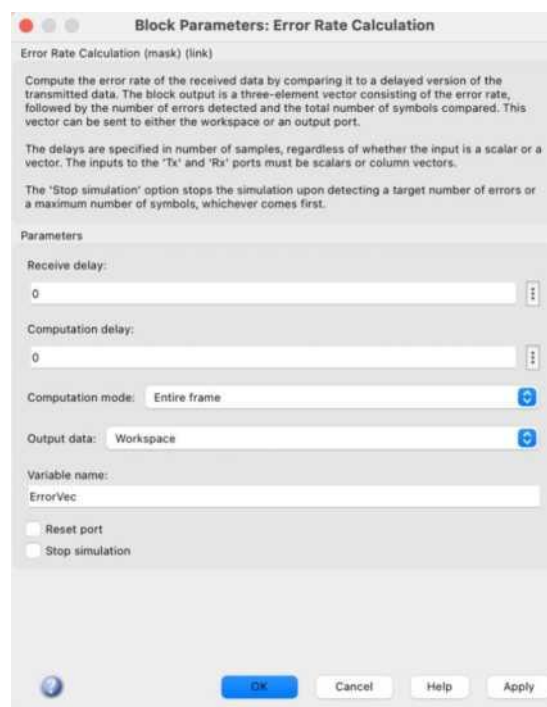


Рис. 11 Вікно налаштування блоку Simulink

Відкрийте вікно параметрів, клацнувши двічі на необхідний блок, та виберіть для параметра **Output Data** варіант **Port** (рис. 12).

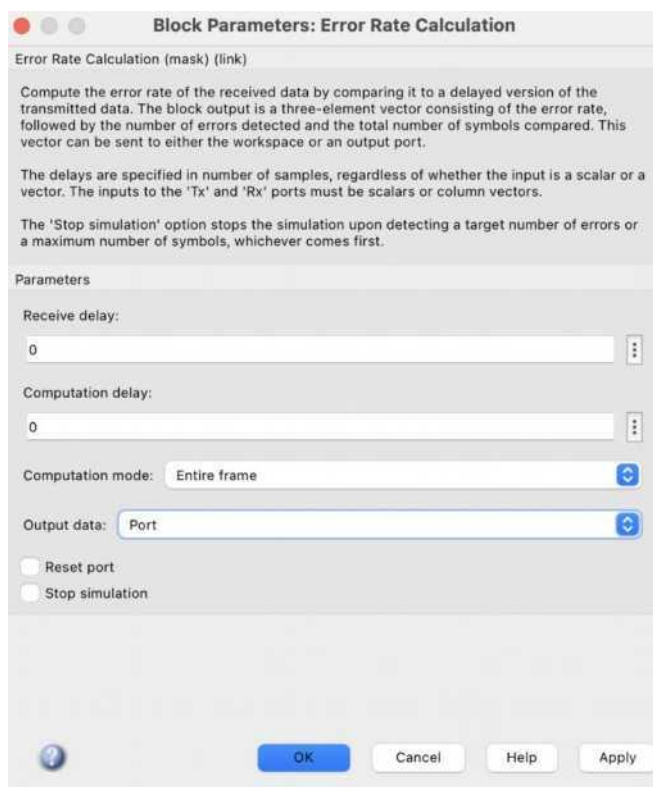


Рис. 12 Вікно налаштування блоку Error Rate Calculation

Після закриття вікна параметрів блоку з'явиться вихідний сигнал. Помістіть у модель блок числового дисплея (**Simulink** $\Rightarrow$ **Sinks** $\Rightarrow$ **Display**) (рис. 13) та підключіть його до виходу блоку **Error Rate Calculation** (рис. 14).

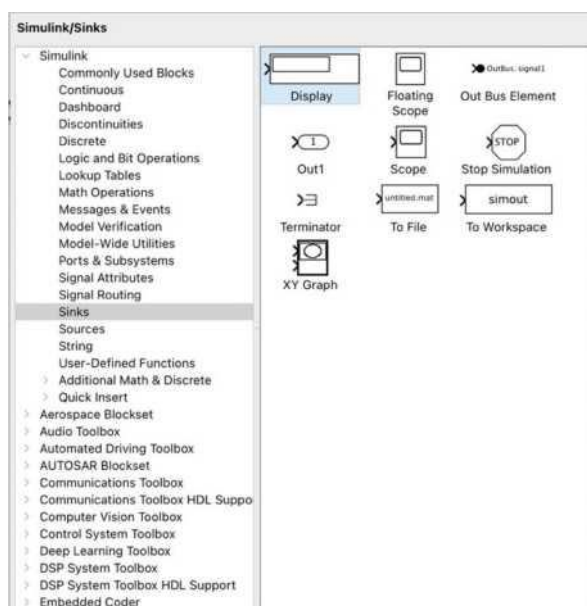


Рис. 13 Display у бібліотеці блоків Simulink

Зв'язки між блоками простягаються мишею; крім того, якщо потрібно підключити єдиний вихід одного блоку до єдиного входу іншого, можна виділити блок-джерело і потім натиснути на блок-приймач, утримуючи клавішу **Ctrl (Command)** - для MacOS).

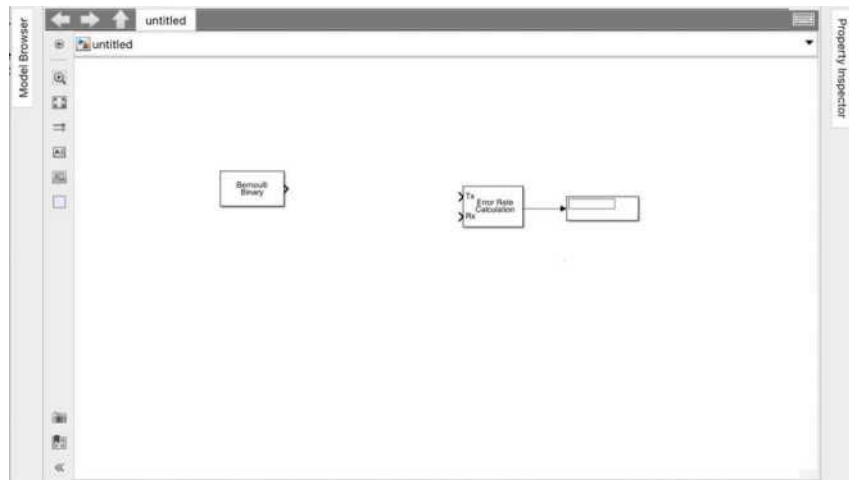


Рис. Модель із блоком Display

При роботі моделі блок **Display** буде виводити стовпець із трьох чисел, тому заздалегідь збільште його вертикальний розмір за допомогою миші (рис. 15).

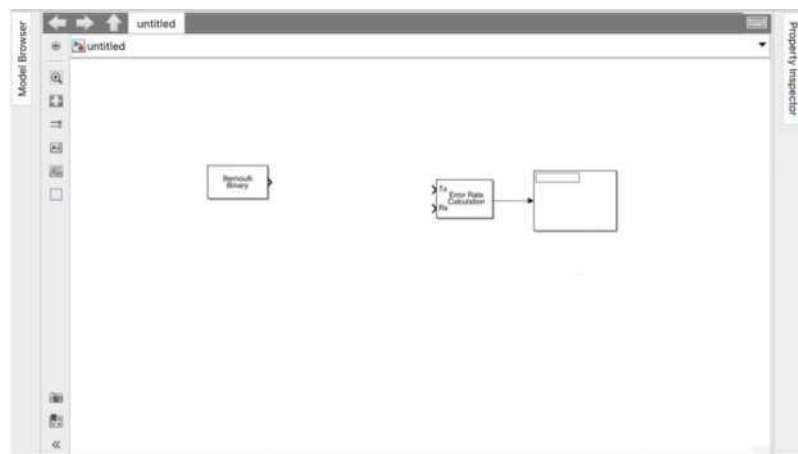


Рис. 15 Модель зі збільшеним блоком Display

Для передачі цифрового сигналу по каналу зв'язку його необхідно перетворити на аналоговий сигнал, тобто. виконати операцію цифрової

модуляції. У цій роботі розглядається найпростіший спосіб низькочастотної двійкової передачі, коли 0 і 1 передаються у вигляді імпульсів однакової форми, що відрізняються лише полярністю. Для формування імпульсів, що задають полярність, бітові значення 0/1 необхідно перетворити на біполярні значення +1/-1 (що чому буде відповідати, не має значення). Реалізуйте таке перетворення за допомогою блоків бібліотек **Simulink** $\Rightarrow$ **Math Operations** $\Rightarrow$ **Sum**, **Simulink** $\Rightarrow$ **Sources** $\Rightarrow$ **Constant** і **Simulink** $\Rightarrow$ **Math Operations** $\Rightarrow$ **Gain**. На рис. 16-18 зображені налаштування перерахованих вище блоків для перетворення в біполярне значення.

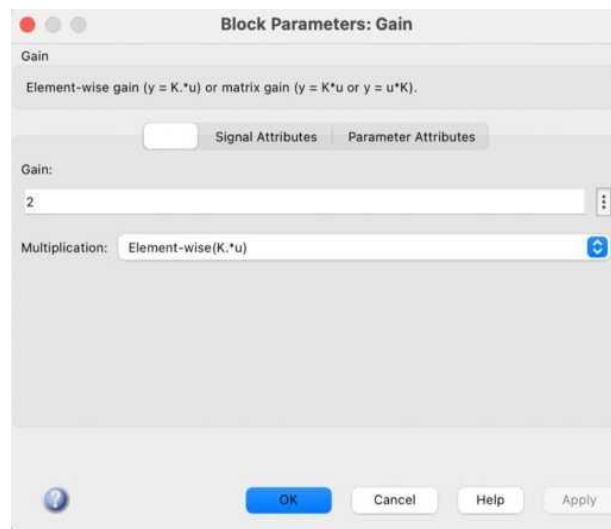


Рис. 16 Налаштування блоку Gain

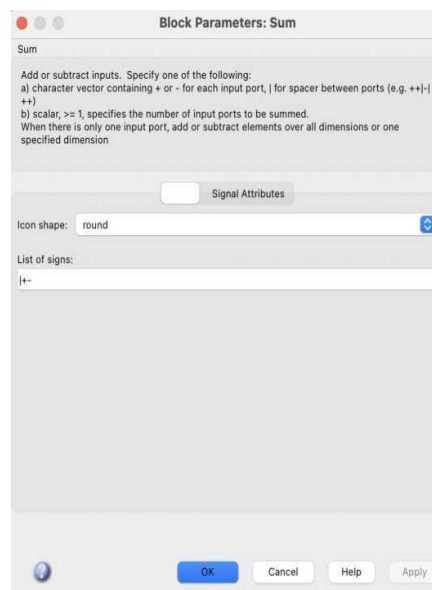


Рис. 17 Налаштування блоку Sum

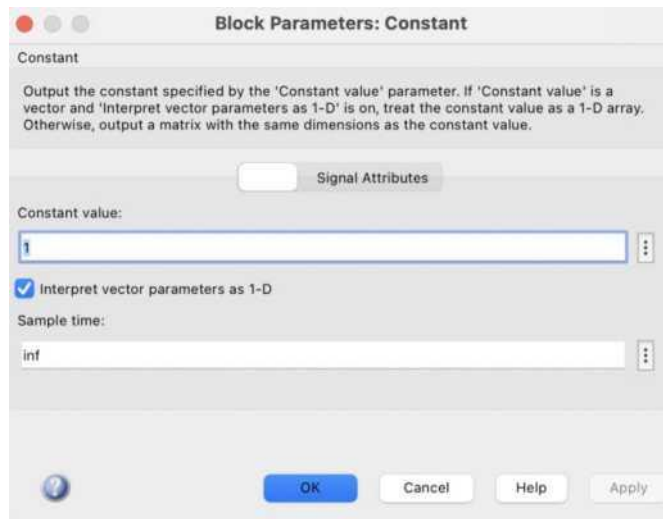


Рис. 18 Налаштування блоку Constant

При прийомі такого сигналу рішення приймається за знаком отриманого значення. Можна реалізувати ухвалення рішення, порівнюючи прийнятий сигнал із нульовим порогом за допомогою блоку **Simulink** $\Rightarrow$ **Logic and Bit Operations** $\Rightarrow$ **Compare To Zero**. Тип порівняння у блоці **Compare To Zero** необхідно вибрати виходячи із заданої раніше відповідності між бітами 0/1 та рівнями сигналу +1/-1.

Вихідний сигнал цього блоку має логічний тип, який доведеться перетворити до числового за допомогою блоку **Simulink** $\Rightarrow$ **Signal Attributes** $\Rightarrow$ **Data Type Conversion**. На рис. 19-20 зображено налаштування блоків.

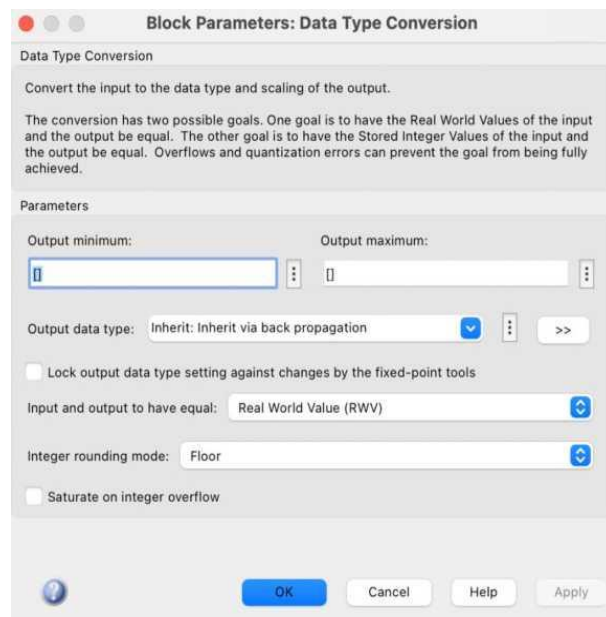


Рис. 19 Налаштування блоку Data Type Conversion

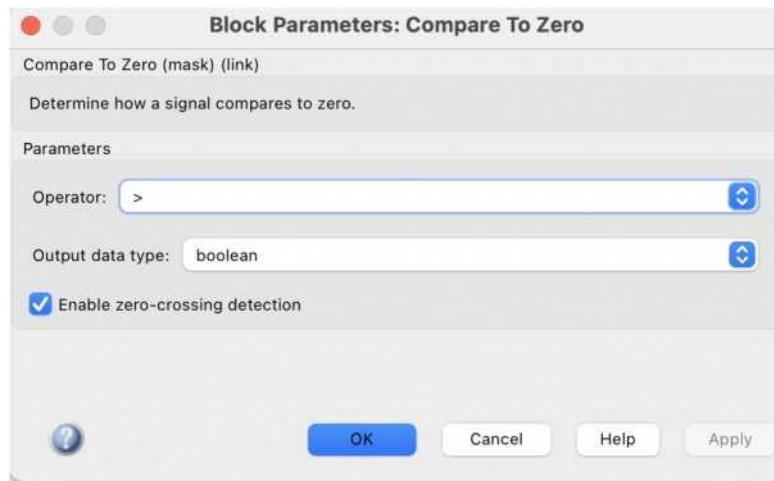


Рис. 20 Налаштування блоку Compare To Zero

Настав час вперше з'єднати все в єдине ціле: бітовий генератор — перетворювач у двополярний сигнал — порівняння з порогом. Блок **Error Rate Calculation** має два входи: **Tx** (передавач) та **Rx** (приймач). На перший потрібно подати вхідну інформацію (з виходу генератора бітового потоку), на другий – прийняті дані (рис. 21).

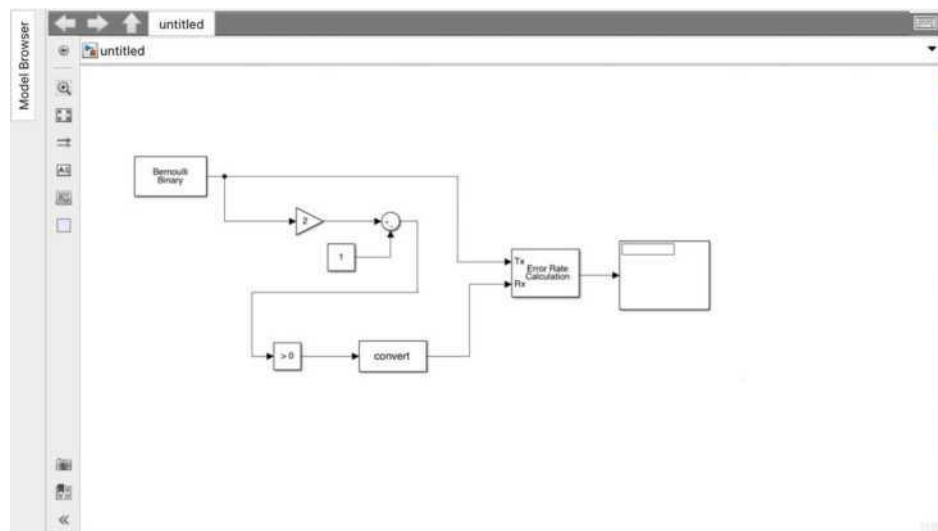


Рис. 21 Сполучена модель з доданими блоками

Тепер можна запустити модель, клацнувши в її панелі інструментів по кнопці **Run** (рис. 22).



Рис. 22 Кнопка Run на панелі інструментів

Дисплей повинен показати нульові значення у двох перших рядках (імовірність помилки та кількість помилок) та 11 у третьому рядку (число оброблених біт) (рис. 23).

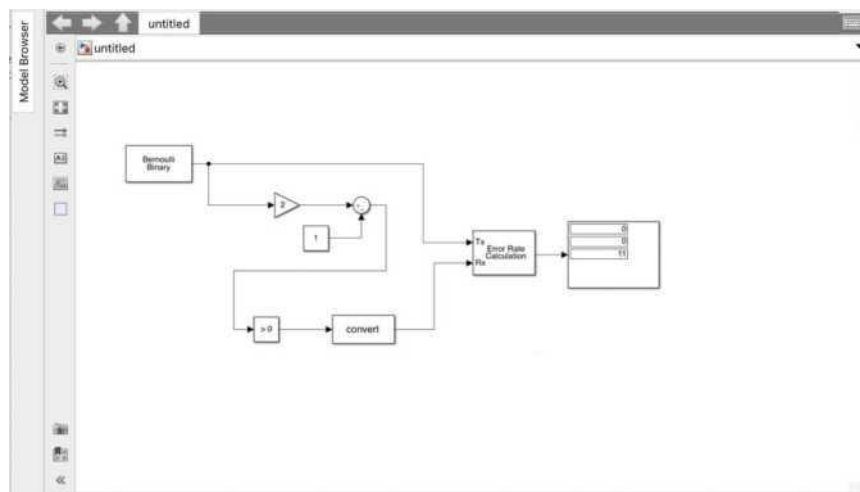


Рис. 23- Результат виконання роботи моделі

Система, що розглядається, не містить аналогових блоків, тому доцільно використовувати режим моделювання з дискретним часом. Крім того, потрібно, щоби модель працювала без зупинки. Для виконання зазначених налаштувань відкрийте вікно параметрів моделювання командою меню **Simulation** $\Rightarrow$ **Model Configuration Parameters** або клавішами **Ctrl+E** (**Command+E** – для MacOS) і задайте для параметра **Stop time** значення **inf**, а для параметрів **Type** і **Solver** у розділі **Solver options** виберіть **Fixed-step** і **discrete (no continuous)** відповідно (рис. 24).

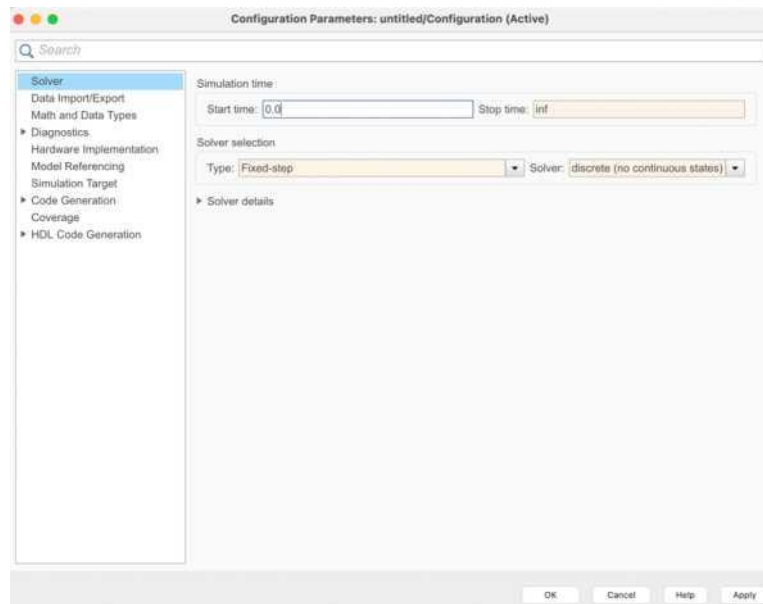


Рис. 24 - Налаштування для моделювання

Закрийте вікно параметрів моделювання та знову запустіть модель. Вона працюватиме, не зупиняючись, демонструючи нульову кількість помилок. Зупиніть роботу моделі натисканням кнопки **Stop**.

3. Додавання формуючого та приймального фільтрів.

Зараз у моделі використовується один відлік сигналу на кожен біт, що передається. Для використання при передачі інформації імпульсів заданої форми необхідно спочатку збільшити частоту дискретизації сигналу, а потім пропустити імпульси які «рідко» надходять через фільтр, що формує, із заданою імпульсною характеристикою (IX).

Підвищити частоту дискретизації можна за допомогою блоку **DSP System Toolbox** $\Rightarrow$ **Signal Operations** $\Rightarrow$ **Upsample**. Помістіть цей блок у модель після формувача двополярного сигналу, задайте підвищення частоти дискретизації у вісім разів (параметр **Upsample factor, L**) і дозвольте багатошвидкісну обробку (варіант **Allow multirate processing** для параметра **Rate options**) (рис. 25).

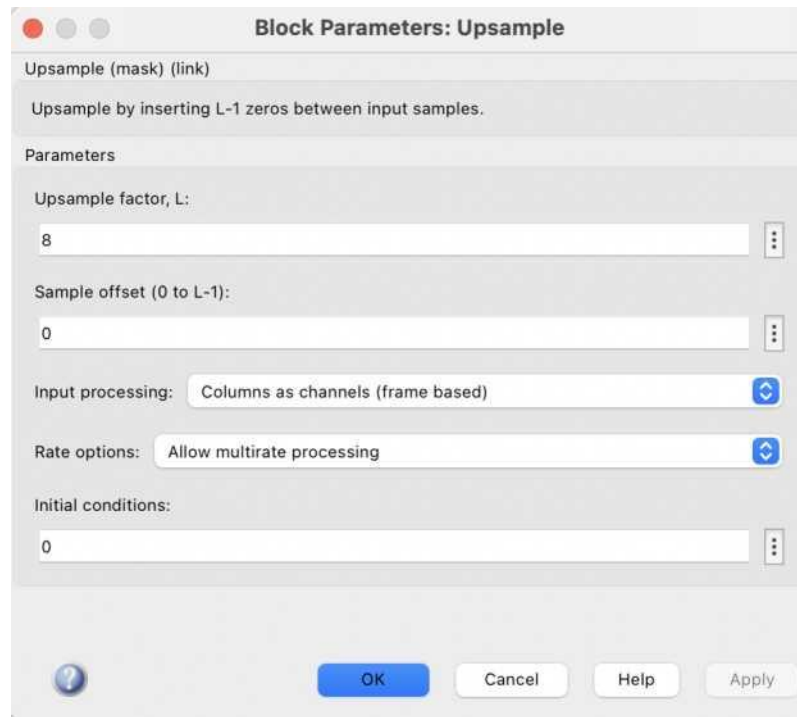


Рис. 25 Налаштування блоку Upsample

Дискретний фільтр можна реалізувати за допомогою блоку **Simulink** $\Rightarrow$ **Discrete** $\Rightarrow$ **Discrete Filter**. Помістіть цей блок у модель після блоку **Upsample** і реалізуйте манчестерське кодування, задавши IX виду $\{1,1,1,1,-1,-1,-1,-1\}$. Цей фільтр далі називатиметься формуючим фільтром. Для реалізації манчестерського кодування необхідно налаштувати блок таким чином (рис. 26):

- Параметр **Numerator** блоку фільтра задає коефіцієнти полінома чисельника функції передачі. Ці коефіцієнти мають бути задані як вектор у форматі MATLAB, тобто. перераховані у квадратних дужках через пробіли або коми: $[1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1]$.

- Параметр **Denominator** визначає коефіцієнти полінома знаменника функції передачі. Введіть тут число 1, тому що в даному випадку необхідний нерекурсивний фільтр.

- Параметр **Sample time** визначає період дискретизації сигналу. Щоб використати той період, з яким уже дискретизовано вхідний сигнал, введіть тут значення -1.

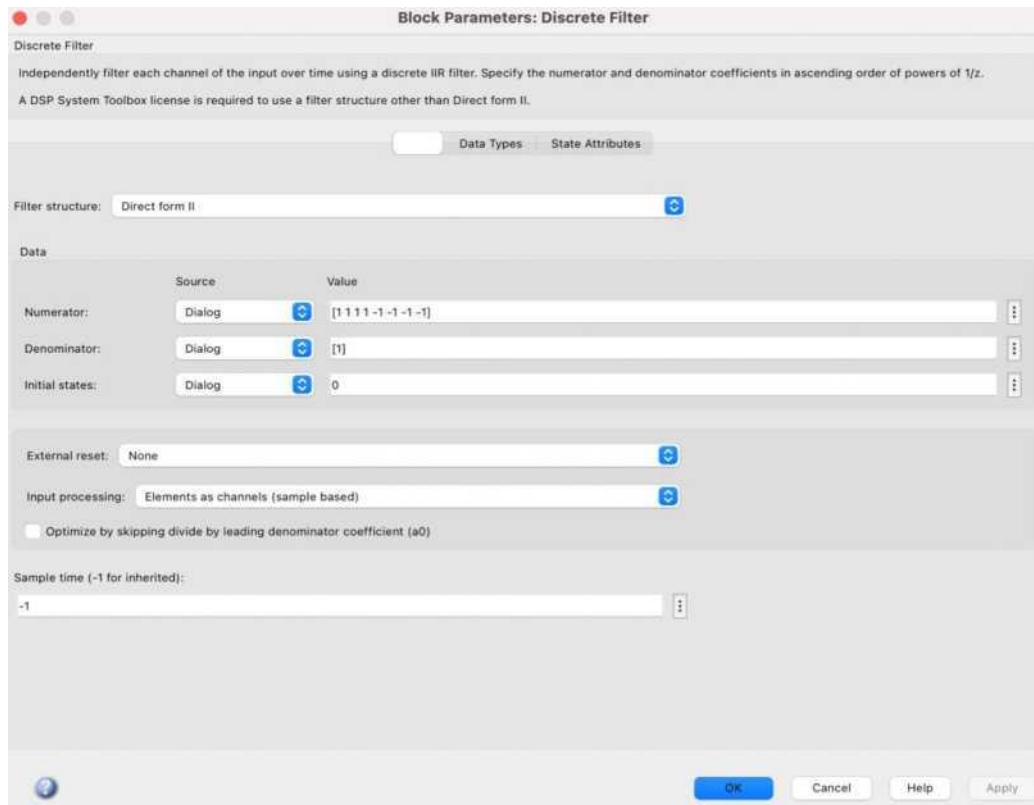


Рис. 26 Налаштування блоку Discrete Filter

При прийомі сигналу необхідна узгоджена фільтрація з пониженням частоти дискретизації. Помістіть у модель ще один дискретний фільтр (відразу після формуючого фільтра) і задайте для нього дзеркально-перевернуту ІХ виду $\{-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1\}$. Цей фільтр надалі називатиметься приймальним фільтром.

Для зниження частоти дискретизації із вихідного сигналу приймального фільтра необхідно вибрати окремі відліки за допомогою блоку **DSP System Toolbox** $\Rightarrow$ **Signal Operations** $\Rightarrow$ **Downsample**. Так само, як і для блоку **Upsample**, задайте зниження частоти у вісім разів (параметр **Downsample factor, L**) і дозвольте багатошвидкісну обробку (варіант **Allow multirate processing** для параметра **Rate options**) (рис. 27).

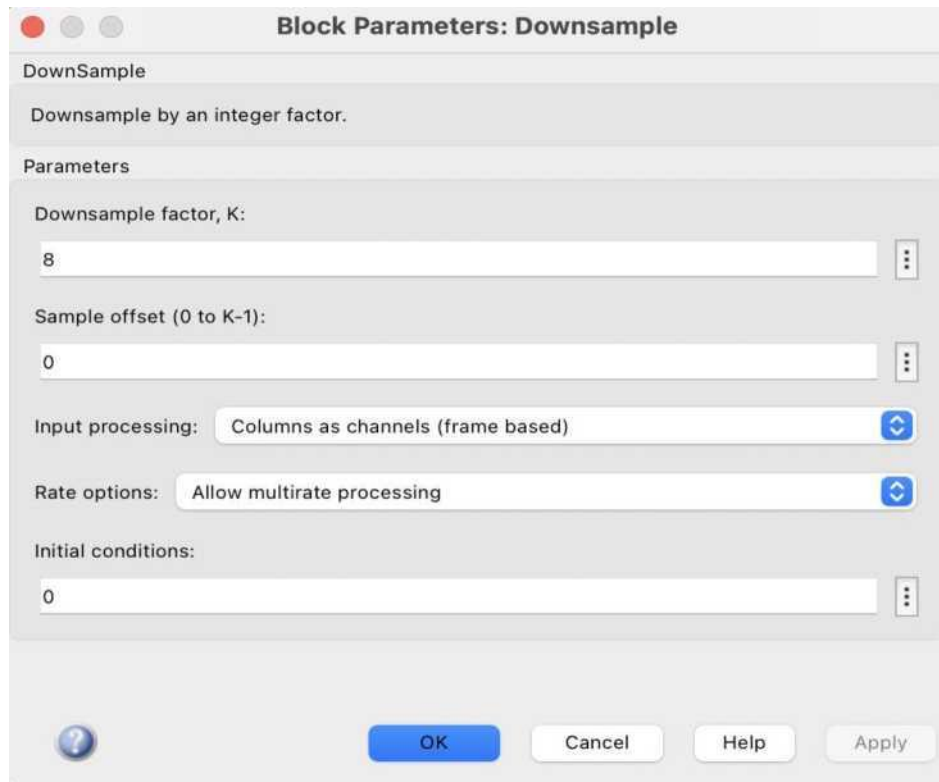


Рис. 27 Налаштування блоку Downsample

В результаті одержуємо наступну модель, зображену на рис. 28.

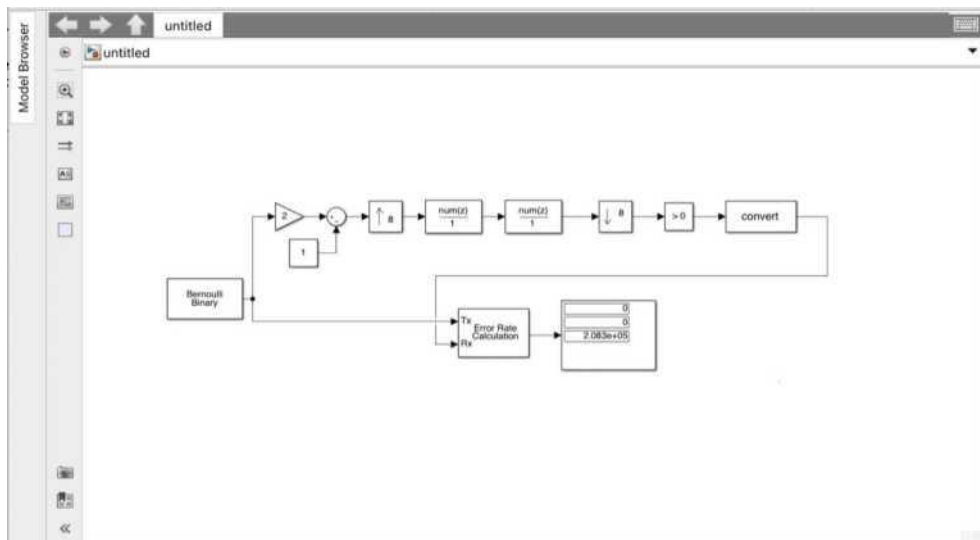


Рис. 28 Модель з фільтрами, підвищенням та пониженням частоти дискретизації

Запустіть модель і переконайтеся, що вона працює неправильно (ймовірність помилки становить близько 50%). Справа в тому, що після

введення, що передаючого і формуючого фільтрів необхідно врахувати два моменти:

- відліки після узгодженого фільтра повинні братися в певні моменти часу (необхідна часова синхронізація);
- процедури фільтрації вносять затримку, яку необхідно врахувати при порівнянні переданого та прийнятого сигналів.

Для контролю форми сигналів та підбору моментів взяття відліків підключіть два осцилографи (блоки **Simulink** $\Rightarrow$ **Sinks** $\Rightarrow$ **Scope**) до виходів приймального фільтра та блоку зниження частоти дискретизації (рис. 29).

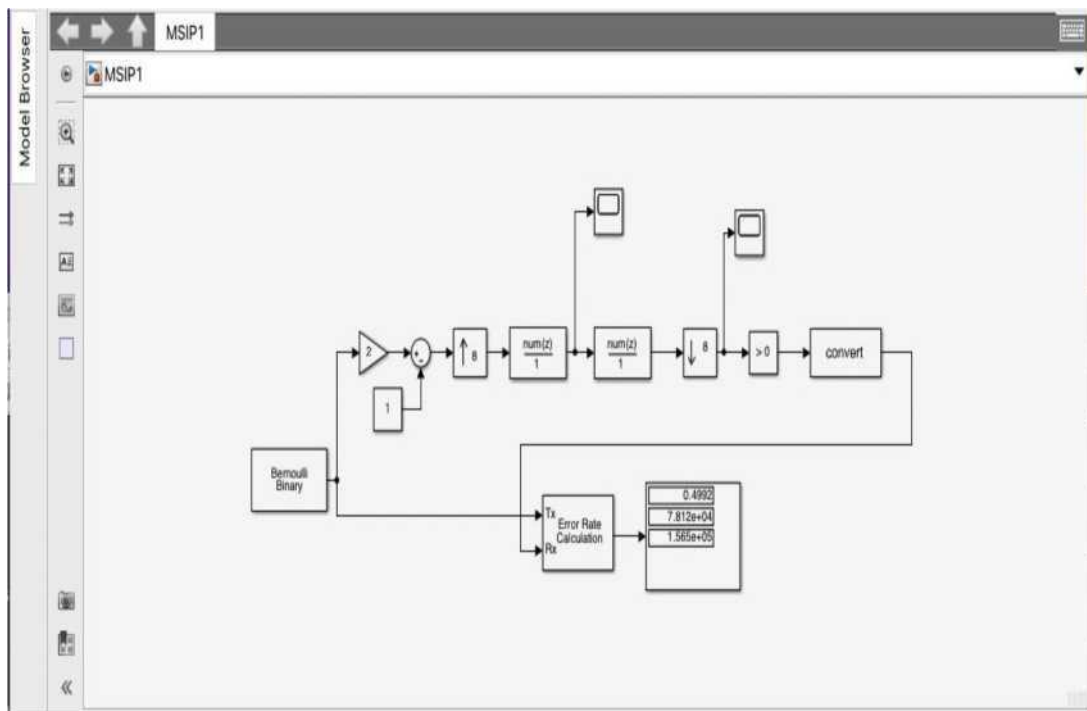


Рис. 29 Модель із підключеними осцилографами

Для відкриття вікна осцилографа зробіть подвійне клацання на блоці **Scope**. Для автоматичного підбору масштабу зображення в меню вікна осцилографа виберіть команду **Tools** $\Rightarrow$ **Axis Scaling** $\Rightarrow$ **Automatically Scale Axes Limits**. Для аналізу осцилограма призупиніть роботу моделі кнопкою **Pause**.

Запустіть модель. Ви побачите, що максимальний розмах сигналів до та після зниження частоти дискретизації не збігається (рис. 30-31).

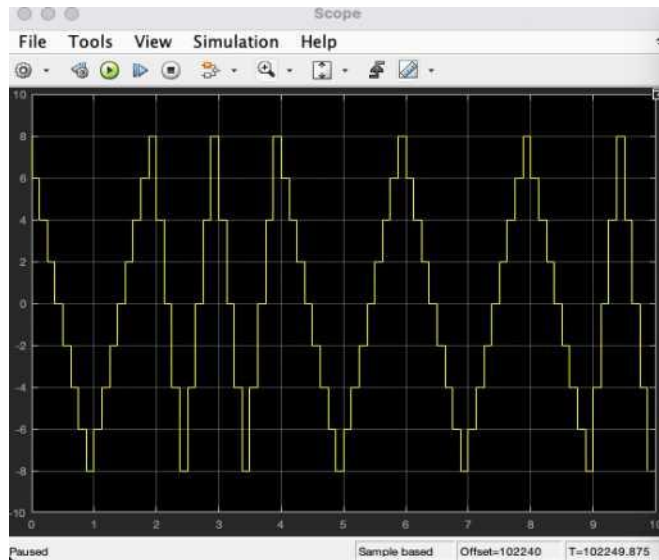


Рис. 30 Вікно осцилографа після прийомного фільтра

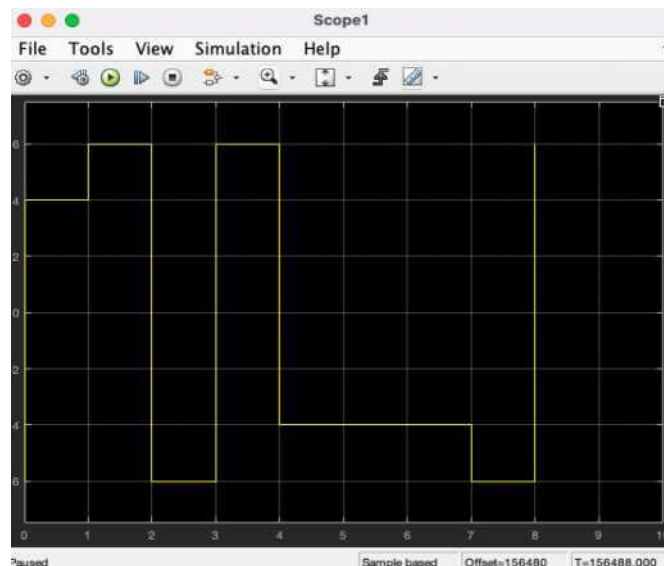


Рис. 31 Вікно осцилографа після блоку зниження частоти дискретизації

Це означає, що відліки беруться не в ті моменти, коли сигнал на виході узгодженого фільтра досягає максимуму. Скоригуйте моменти взяття відліків, регулюючи параметр **Sample offset** блоку **Downsample**.

При підборі моментів взяття відліків необхідно звернути увагу, що сигнал після зниження частоти дискретизації повинен приймати лише великі за модулем значення. Справа в тому, що при використанні манчестерського кодування можлива помилка (зі зсувом на половину символу) синхронізація, розмах сигналу при цьому такий же, як при правильній

синхронізації, але, крім великих за модулем, сигнал приймає також значення, близькі до нуля. В результаті повинен вийти такий розмах сигналів як на рис. 32-33.

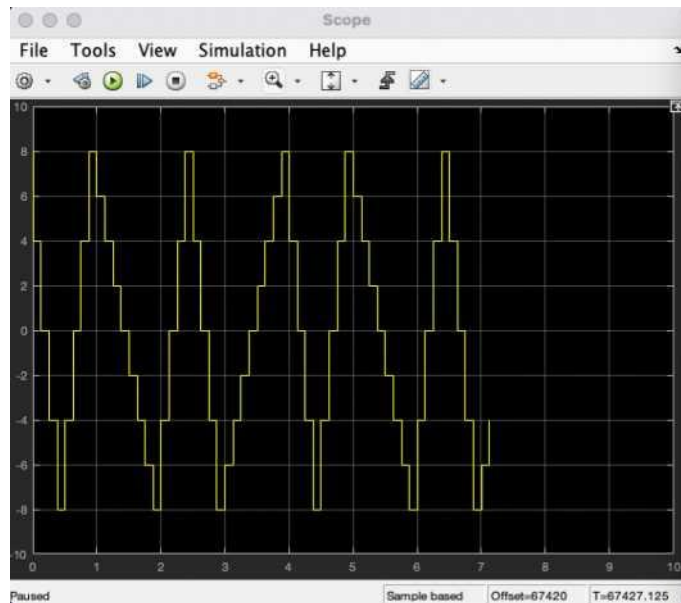


Рис. 32 - Вікно осцилографа після прийомного фільтра

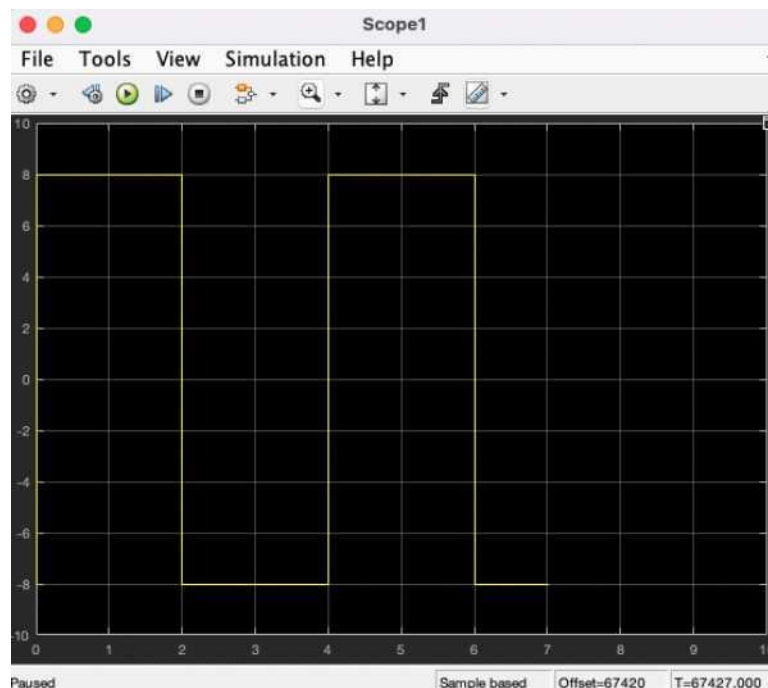


Рис. 33 Вікно осцилографа після блоку зниження частоти дискретизації

Компенсація затримки, що вноситься в сигнал під час його обробки, здійснюється безпосередньо в блоці **Error Rate Calculation** (параметр **Receive**

delay). Проаналізуйте затримки, що з'являються в моделі, і підберіть таке значення цього параметра, щоб модель працювала без помилок. В результаті дисплей повинен показувати такі результати (рис. 34).

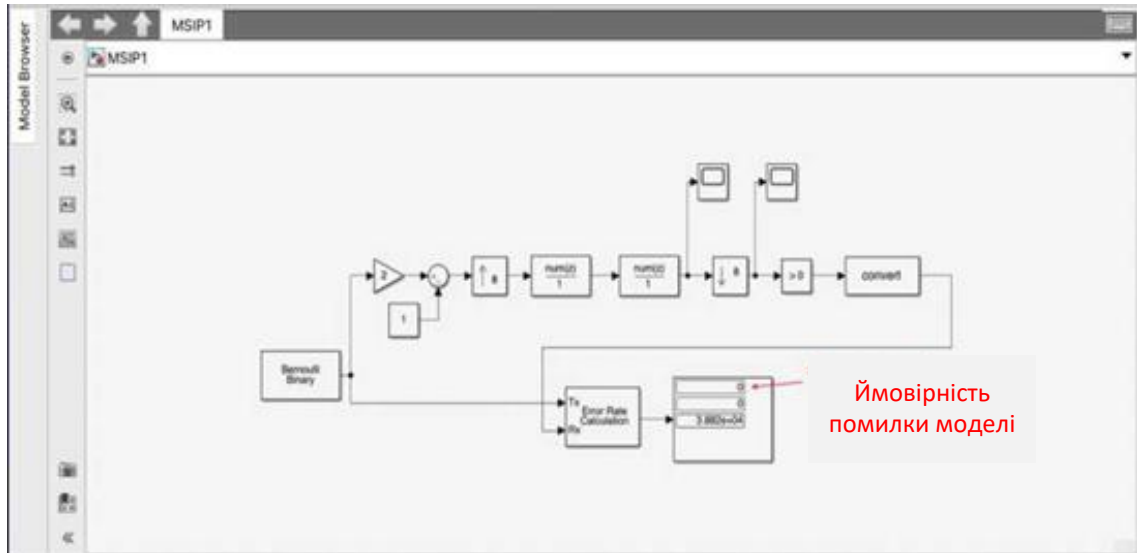


Рис. 34 Модель із підібраним значенням затримки

4. Додавання шуму та перегляд спектра сигналу.

Для перегляду спектра сигналу, що формується, підключіть після формуючого фільтру блок **DSP System Toolbox** $\Rightarrow$ **Sinks** $\Rightarrow$ **Spectrum Analyzer** (рис. 35).

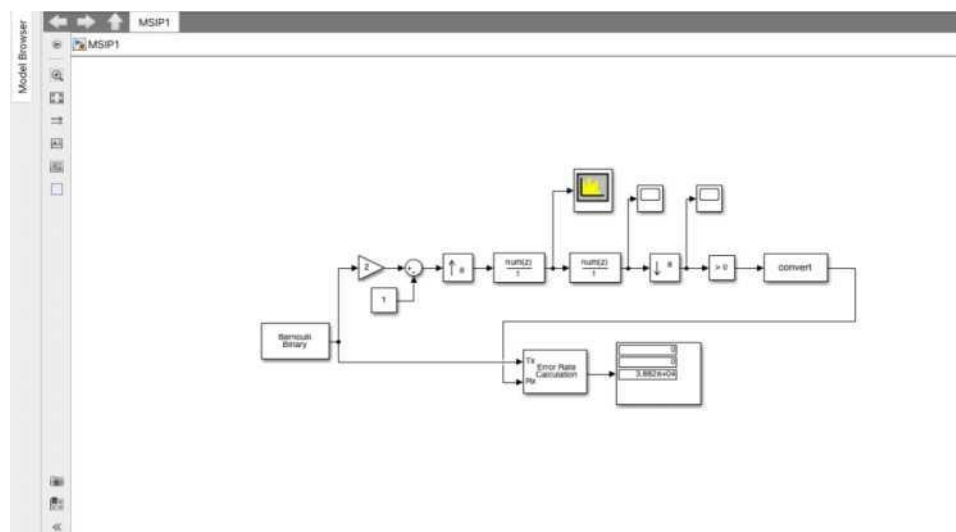


Рис. 35 Модель із блоком спектрального аналізу

Запустіть модель та спостерігайте спектр сигналу (рис. 36). Вікно графіка **Spectrum Analyzer** відкривається автоматично під час запуску моделі. Автоматичне масштабування графіка виконується теж автоматично, за бажанням змінити межі вертикальної осі скористайтесь кнопкою **Zoom Y** панелі інструментів вікна аналізатора.

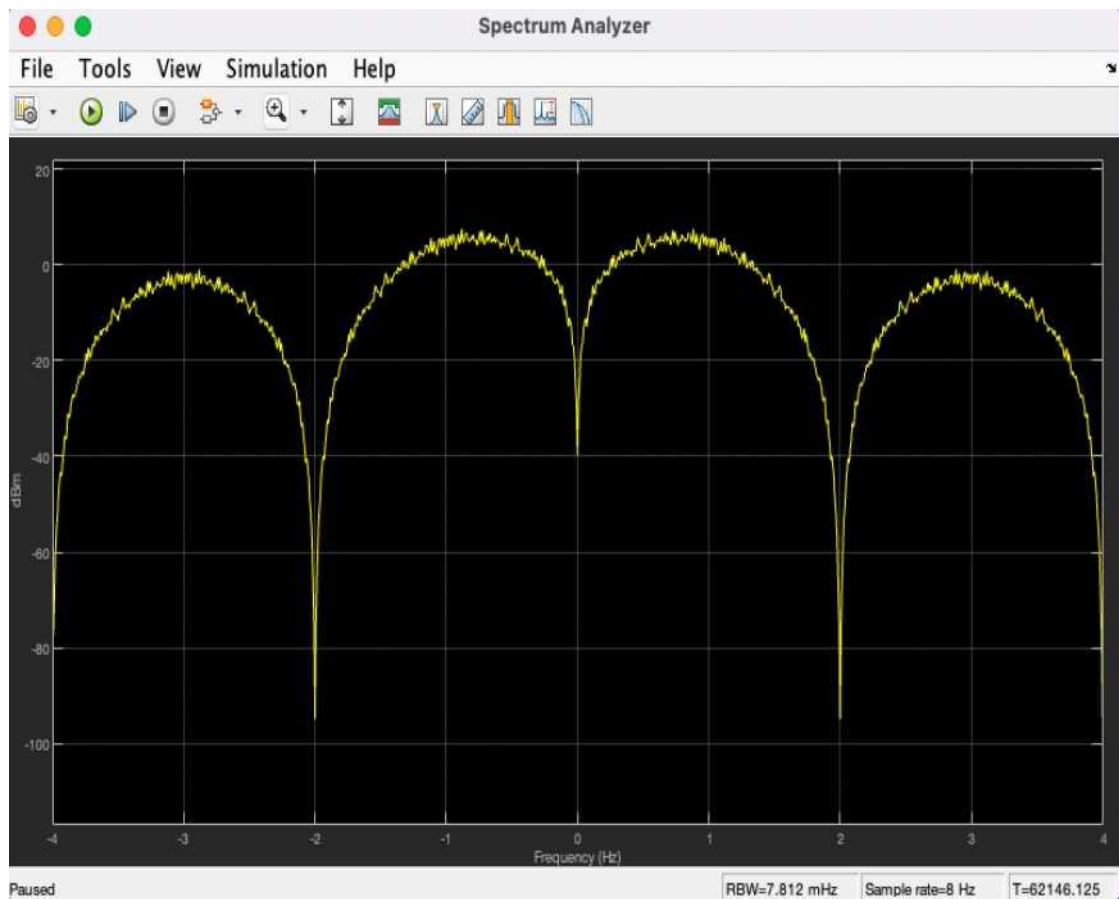


Рис. 36 Вікно графіка блоку Spectrum Analyzer

Щоб зменшити дисперсію (розкид) спектральної оцінки, відкрийте панель параметрів (кнопка **Spectrum Settings**, сама ліва в панелі інструментів вікна аналізатора спектра). У цій панелі необхідно розгорнути нижній розділ (**Trace options**), поміняти **Averaging Methods** на метод **Running** і збільшити значення **Averages**, наприклад, до 10 (рис. 37). Після цього панель налаштувань можна знову приховати.

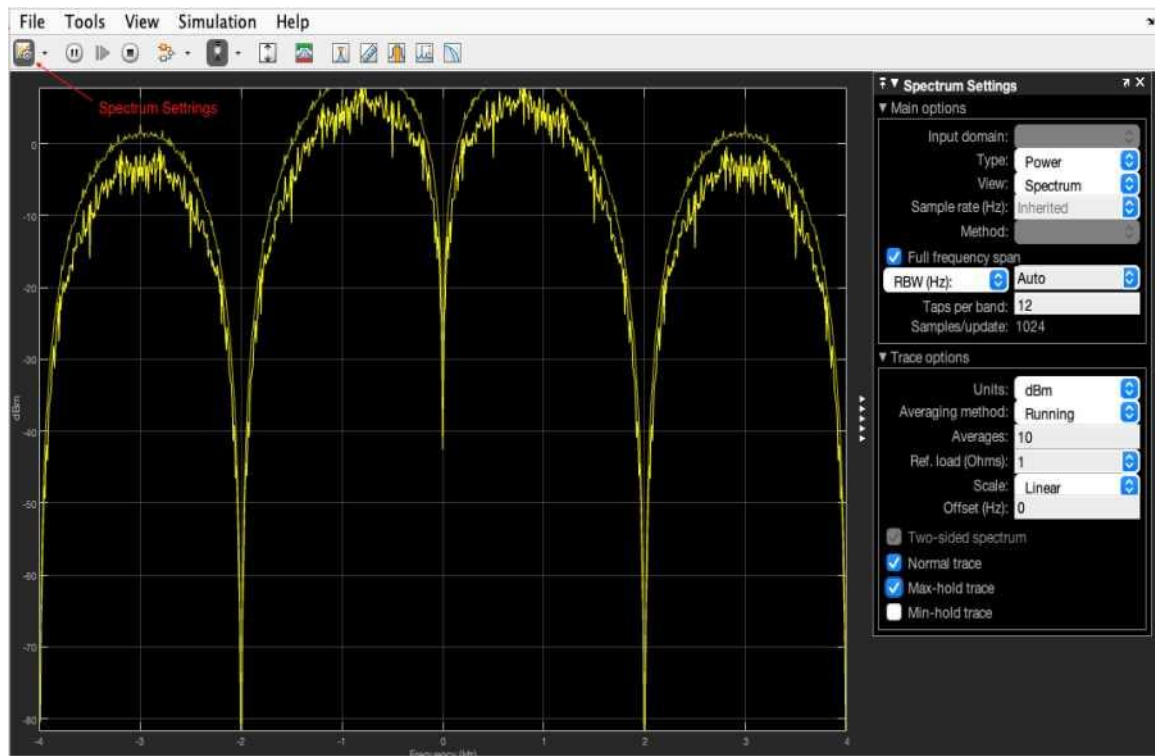


Рис. 37 - Вікно графіка блоку Spectrum Analyzer з налаштуваннями

Додавання адитивного білого гауссового шуму здійснюється за допомогою блоку **Communications Toolbox** $\Rightarrow$ **Channels** $\Rightarrow$ **AWGN Channel**. Помістіть цей блок у модель між формуючим та приймальним фільтрами (рис. 38). Для параметра **Initial seed** (початковий стан генератора випадкових чисел) вкажіть значення **randseed** (випадковий початковий стан). Інші параметри блоку **AWGN Channel** мають такий зміст (рис. 39):

- **Input signal power** – потужність (тобто середній квадрат модуля) вхідного сигналу;
- **Symbol period** – тривалість передачі одного символу.

В даному випадку вид формуючого фільтра заданий так, що середній квадрат сигналу дорівнює 1, а тривалість передачі символу визначається періодом дискретизації, заданим у джерелі даних **Bernoulli Binary Generator** (за умовчанням він дорівнює 1). Таким чином, необхідні значення цих двох параметрів у даному випадку збігаються зі значеннями, прийнятими за умовчанням.

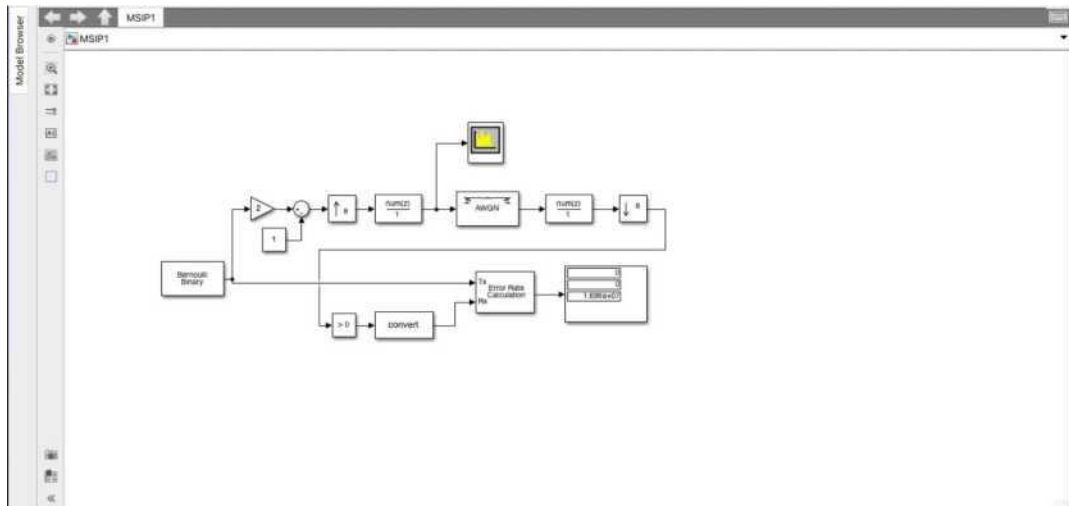


Рис. 38 Модель із блоком AWGN Channel

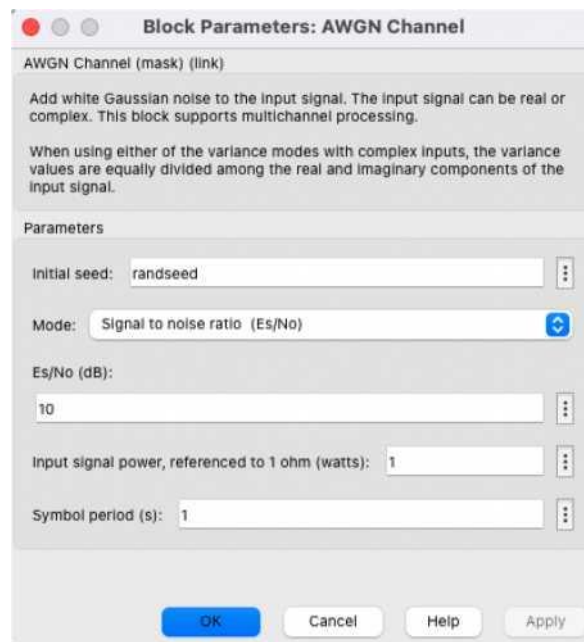


Рисунок 39 - Налаштування для блоку AWGN Channel

Зніміть залежність ймовірності помилки від відношення сигнал/шум (С/Ш) на символ (E_s / N_0), змінюючи відношення E_s / N_0 в діапазоні від -3 до +7 дБ з кроком 1 дБ. Для кожного випадку необхідно дочекатися появи щонайменше 100 помилок. Дані записуються в таблицю 1 у такому вигляді: ($P_{ном}$ – оцінка ймовірності помилки; $N_{ном}$ – число помилок; $N_{бim}$ – число оброблених символів; останній стовпець σ_p – середньоквадратичне відхилення (СКВ) оцінки ймовірності помилки - заповнюється при підготовці

звіту).

Таблиця 1 – Дані виконання моделі залежно від E_s / N_0

E_s / N_0 , дБ	$P_{ном}$	$N_{ном}$	$N_{бim}$	σ_p

Можна ввімкнути автоматичне завершення моделювання при досягненні заданого числа помилок, встановивши в блоці **Error Rate Calculation** прапорець **Stop simulation** і задавши для параметра **Target number of errors** значення 100. При цьому можна обмежити загальну кількість оброблюваних символів, ввівши в поле **Maximum number of symbols** значення $1e6$ (10^6) (рис. 40)..

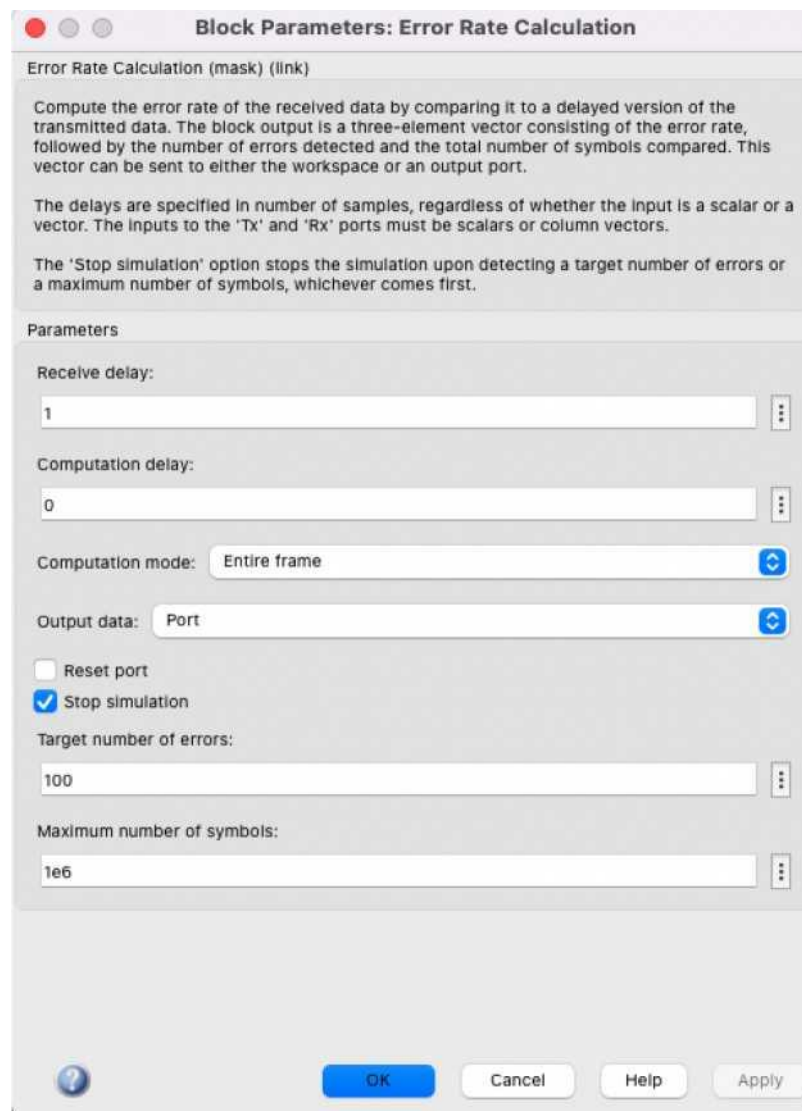


Рис. 40 Налаштування для блоку Error Rate Calculation

Зміст звіту

1. Схема створеної моделі з короткими коментарями призначення її блоків.

2. Графік використаної форми посилки та її кореляційної функції (графік повинен бути отриманий розрахунковим шляхом); приклади графіків сигналу моделі до і після приймального узгодженого фільтра.

3. Отримані виходячи з форми КФ формула і графік енергетичного спектра сигнальної посилки, що використовується (по вертикалі використовувати логарифмічний масштаб – в децибелах щодо деякого довільно обраного значення) і отриманий експериментально графік СПМ сигналу.

4. Таблиці перешкодостійкості, отримані за відсутності та за наявності скремблювання сигналу. У таблицях має бути заповнений останній стовпець (СКО оцінки бітової помилки). СКО розраховується за такою формулою:

$$\sigma_p = \sqrt{P(1-P)/N_{\text{бim}}},$$

де $N_{\text{бim}}$ – кількість оброблених біт; P – ймовірність помилки (замість істинного значення використовувати отриману внаслідок моделювання оцінку).

5. Висновки по лабораторній роботі.