

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 4                                 |

## Лабораторна робота 1

### Проходження цифрового сигналу через лінійний канал зв'язку

#### 1. Мета роботи

Дослідження проходження цифрового сигналу через лінійний канал зв'язку. У результаті виконання лабораторної роботи студент повинен знати як змінюється цифровий сигнал під час проходження через лінійний канал зв'язку, смуга пропускання якого обмежує його спектральну характеристику в області верхніх та нижніх частот.

#### 2. Теоретичні відомості і розрахункові формули

##### Канал зв'язку

**Каналом зв'язку** називається сукупність засобів, що забезпечують передачу сигналу від деякої точки А системи до точки В (рис. 1.1).

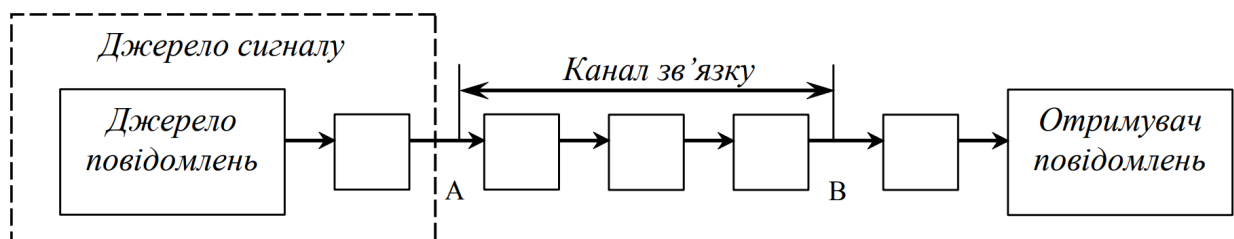


Рис. 1.1. – Канал зв'язку

Точки А і В можуть бути обрані довільно, аби тільки між ними проходив сигнал. Частина системи зв'язку, розташована до точки А, є джерелом сигналу для цього каналу. Якщо сигнали, що надходять на вхід каналу і знімаються з його виходу, є дискретними, то канал називається **дискретним**. Якщо вхідні і вихідні сигнали каналу є неперервними, то і канал називається **неперервним**. Зустрічаються також **дискретно-неперервні** і **неперервно-дискретні** канали, на вхід яких надходять дискретні сигнали, а з виходу знімаються неперервні, або навпаки. Зі сказаного видно, що канал може бути дискретним або неперервним незалежно від характеру переданих повідомлень.

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 5                                 |

Більше того, в одній і тій же системі зв'язку можна виділити як дискретний, так і неперервний канали. Все залежить від того, яким чином обрані точки А і В входу і виходу каналу.

Неперервний канал зв'язку можна характеризувати так само, як і сигнал, трьома параметрами: часом  $T_k$ , протягом якого по каналу ведеться передача, динамічним діапазоном  $D_k$  і смугою пропускання каналу  $F_k$ . Під динамічним діапазоном каналу розуміють відношення припустимої потужності переданого сигналу до потужності завади, що неминуче присутня в каналі, виражене в децибелах.

Типи каналів, по яких передаються повідомлення, численні і різноманітні. Широко застосовуються канали дротового зв'язку, короткохвильового радіозв'язку з використанням відбиття від іоносфери, ультракороткохвильового зв'язку іоносферного і тропосферного розсіювання, метеорному зв'язку, космічному зв'язку та інше. Характеристики цих каналів значно відрізняються один від одного.

Загальними ознаками неперервних каналів є, по-перше, лінійність. У таких каналах вихідний сигнал є сумою вхідних сигналів і завад (принцип суперпозиції), а результати нелінійних перетворень в каналі малі в порівнянні з вихідними сигналами. По-друге, на виході каналу навіть під час відсутності корисного сигналу завжди є завади. По-третє, сигнал при передачі по каналу отримує затримку за часом і загасання за рівнем. І, нарешті, у реальних каналах завжди мають місце перекручування сигналу, обумовлені недосконалістю характеристик каналу і, нерідко, змінами параметрів каналу в часі.

Узагальненою характеристикою безперервного каналу є його обсяг:

$$V_k = T_k F_k D_k \quad (1.1)$$

Необхідною умовою неперекрученої передачі по каналу сигналів з обсягом  $V_c$  є

$$V_c \leq V_k \quad (1.2)$$

Перетворення первинного сигналу у високочастотний сигнал має на меті узгодження сигналу із каналом. У найпростішому випадку сигнал погоджують із

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 6                                 |

каналом по всіх трьох параметрах, тобто забезпечують виконання умов:

$$T_c \leq T_k, F_c \leq F_k, D_c \leq D_k \quad (1.3)$$

При цих умовах обсяг сигналу повністю «розміщується» в обсязі каналу. Однак нерівність (1.2) може виконуватися і тоді, коли одне або два з нерівностей (1.3) не виконані. Це означає, що можна робити «обмін» тривалості на ширину спектра або ширину спектра на динамічний діапазон тощо.

Нехай, наприклад, записаний на плівку телефонний сигнал, що має ширину спектра 3 кГц, необхідно передати через канал, смуга пропускання якого 300 Гц. Це можна здійснити, відтворюючи сигнал зі швидкістю в 10 раз меншої тієї, з якою він був записаний. При цьому всі частоти вихідного сигналу зменшуються в 10 разів і в стільки ж разів збільшується час передачі. Прийнятий сигнал також записується на плівку, а потім, відтворивши його з в 10 разів більшою швидкістю, можна відновити вихідний сигнал. Аналогічно можна передати сигнал швидше, ніж він створювався, якщо смуга пропускання каналу ширше спектра сигналу.

Значно більший інтерес являє можливість обміну динамічного діапазону на смугу пропускання. Так, використовуючи широкосмугові завадостійкі види модуляції, можна передати повідомлення з динамічним діапазоном, наприклад, 60 дБ, по каналу, в яком сигнал перевищує заваду всього лише на 20 дБ. При цьому використовується смуга пропускання каналу, у кілька разів більша спектра повідомлення.

У реальному каналі сигнал при передачі перекручується, тому повідомлення відтворюється з деякою похибкою. Причиною таких помилок є викривлення, внесені самим каналом, і завади, що впливають на сигнал.

Частотні і часові характеристики каналу визначають так називані лінійні перекручування. Крім того, канал може вносити і нелінійні спотворення, обумовлені нелінійністю тих або інших ланок каналу. Якщо лінійні і нелінійні спотворення зумовлені відомими характеристиками каналу, то вони, у принципі, можуть бути усунуті належним корегуванням.

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 7                                 |

## Частотні RC-фільтри

Частотним фільтром називають радіотехнічний пристрій, який володіє здатністю порівняно легко пропускати змінні сигнали окремих частот і пригнічувати змінні сигнали, що лежать поза цими частотами.

**Фільтром високих частот (ФВЧ)** називають такий фільтр, який пропускає змінні сигнали високих частот і послаблює (зменшує амплітуду) сигналів з частотами нижче частоти зрізу фільтра.

**Фільтром низьких частот (ФНЧ)** називають такий фільтр, який пропускає змінні сигнали низьких частот та послаблює частоти, розташовані вище частоти зрізу фільтра.

**Смуговим фільтром** називають такий фільтр, який пропускає зміни сигнали в певному діапазоні (смузі) частот та послаблює (вирізає) сигнали частот за межами цієї смуги

**Загороджувальний (режекторний) фільтр** – фільтр, що не пропускає сигнали з частотами з певного визначеного діапазону та пропускає сигнали з усіма іншими частотами (які в цей діапазон не потрапляють).

Будь-фільтр характеризується комплексним коефіцієнтом передачі  $K_{\Pi}(j\omega)$ :

$$K_{\Pi}(j\omega) = \frac{\vec{U}_2}{\vec{U}_1}, \quad (1.4)$$

де  $\vec{U}_1$  – вектор змінної напруги на вході фільтра;  $\vec{U}_2$  – вектор змінної напруги на виході фільтра;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота змінного сигналу.

Комплексний коефіцієнт передачі являє собою запис двох характеристик: амплітудно-частотної (АЧХ) і фазочастотної (ФЧХ):

$$K_{\Pi}(j\omega) = N_1(\omega) + N_2(\omega), \quad (1.5)$$

Перша характеристика виражається модулем комплексного коефіцієнта Передачі  $K_{\Pi}(\omega)$ , а друга – його аргументом  $\varphi(\omega)$

$$K_{\Pi}(\omega) = \sqrt{N_1^2(\omega) + N_2^2(\omega)}, \quad (1.6)$$

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 8                                 |

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{N_2(\omega)}{N_1(\omega)}, \quad (1.7)$$

Якщо зміни амплітуд вхідного і вихідного сигналів великі, то АЧХ виражають в логарифмічному масштабі. З цією метою вводиться логарифмічна одиниця виміру модуля комплексного коефіцієнта передачі – децибел, яка визначається рівністю:

$$K_{\Pi}(j\omega), = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.8)$$

де  $U_1$  і  $U_2$  – амплітудні значення вхідної і вихідної напруги.

### RC-фільтр високих частот

Схема RC-фільтра високих частот наведена на рис.1.2 а.

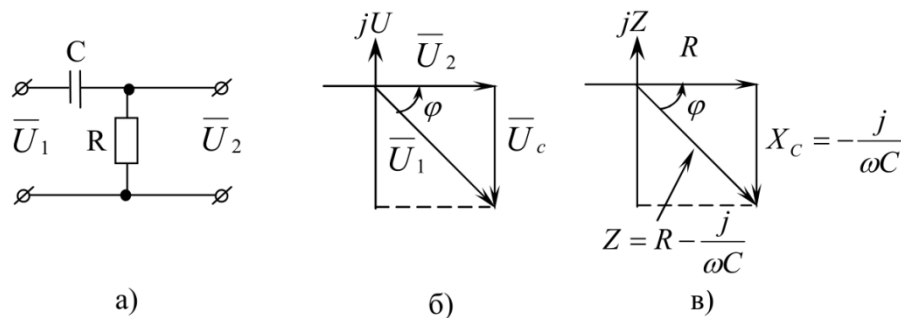


Рис.1.2 – RC-фільтр високих частот

а – схема; б – векторна діаграма напруг; в – векторна діаграма опорів

Комплексний коефіцієнт передачі такого фільтра дорівнює:

$$K_{\Pi}(j\omega) = \frac{\vec{U}_2}{\vec{U}_1} = \frac{R}{R - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}. \quad (1.9)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) має вигляд:

$$K_{\Pi}(\omega) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (-j \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}. \quad (1.10)$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) має вигляд:

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 9                                 |

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega RC}. \quad (1.11)$$

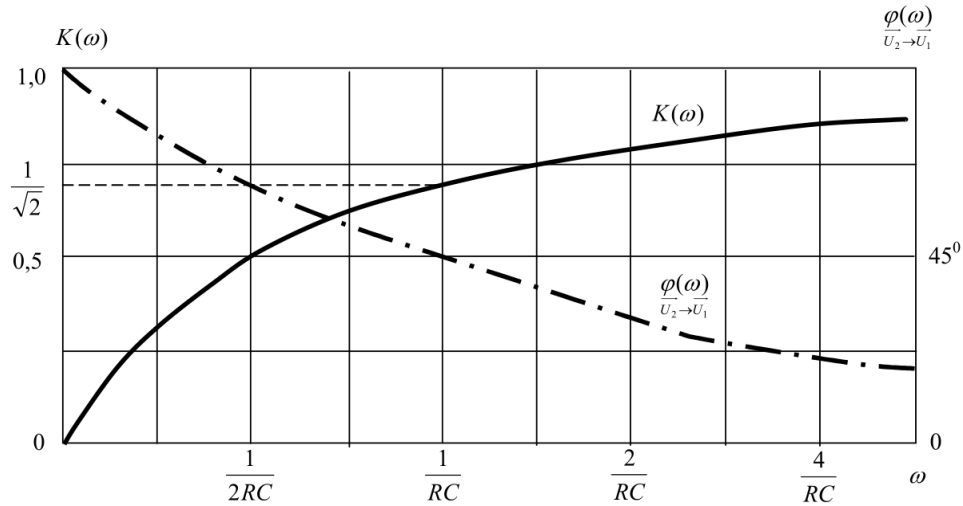


Рис.1.3 – Амплітудно-частотна (а) і фазочастотна (б) характеристики RC-фільтра високих частот

З векторної діаграми (рис.1.2 б) випливає, що вихідний сигнал випереджає вхідний сигнал на кут  $\varphi(\omega)$ . АЧХ і ФЧХ фільтра високих частот наведені на рис.1.3. При частоті сигналу рівній  $\omega_{зр} = \frac{1}{RC}$  амплітуда сигналу зменшується на -3дБ, тобто в  $\sqrt{2}$  раз, а вихідний сигнал випереджає вхідний сигнал на  $45^\circ$ . Така частота називається частотою зрізу фільтра.

### RC-фільтр низьких частот

Схема RC-фільтра низьких частот наведена на рис.1.4 а.

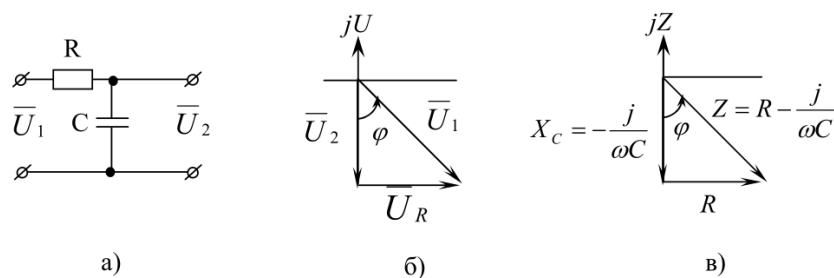


Рис.1.4 – RC-фільтр низьких частот

а – схема; б – векторна діаграма напруг; в – векторна діаграма опорів

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 10                                |

Комплексний коефіцієнт передачі такого фільтра дорівнює:

$$K_{\Pi}(j\omega) = \frac{\vec{U}_2}{\vec{U}_1} = \frac{-j \frac{1}{\omega C}}{R - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{1 + \omega RC}. \quad (1.12)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) має вигляд:

$$K_{\Pi}(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}. \quad (1.13)$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) має вигляд:

$$\varphi(\omega) = \arctg(\omega RC). \quad (1.14)$$

З векторної діаграми (рис.1.4 б) випливає, що вихідний сигнал відстає від вхідного сигналу на кут  $\varphi(\omega)$ . АЧХ і ФЧХ фільтра високих частот наведені на рис.2.5. При частоті сигналу рівній  $\omega_{зр} = \frac{1}{RC}$  амплітуда сигналу зменшується на -3дБ, тобто в  $\sqrt{2}$  раз, а вихідний сигнал відстає від вхідного на  $45^\circ$ . Така частота називається частотою зрізу фільтра.

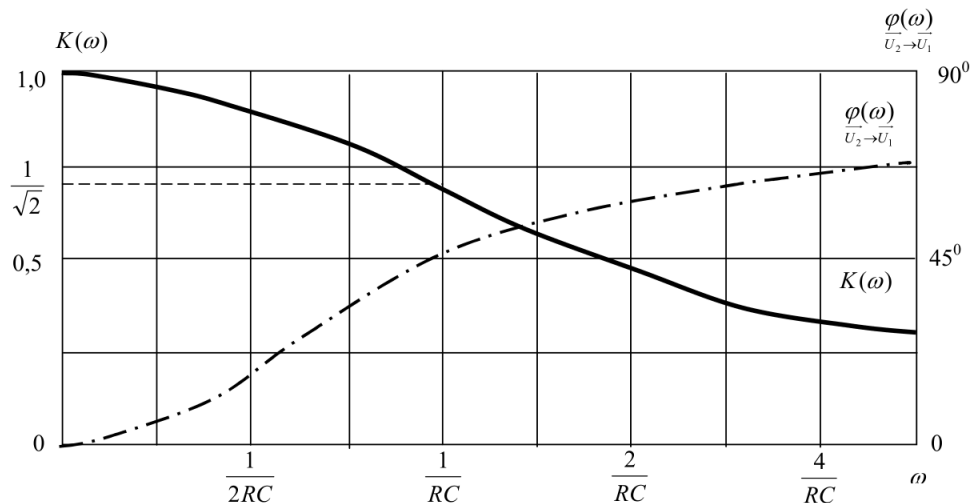


Рис.1.5 – Амплітудно-частотна (а) і фазочастотна (б) характеристики RC-фільтра низьких частот

### 3. Навчальні завдання і методичні вказівки до їх виконання

**Завдання 1.** Запустіть програмне середовище *Scilab 6.1.1*. В графічному

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 11                                |

редакторе *Xcos* зібрати структурну схему макета цифрової системи передачі інформації для виконання досліджень (рис. 1.6),

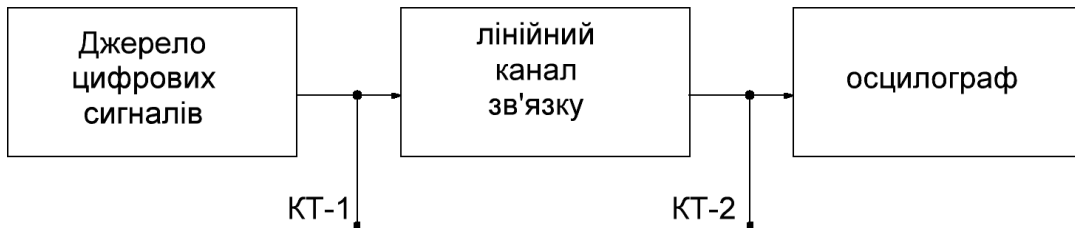


Рис. 1.6. Структурна схема макета цифрової системи передавання інформації

*Джерело цифрових сигналів.* Блок-схема (рис.1.7) формує випадковий синхронний телеграфний сигнал (СТС), що імітує двійкове повідомлення, що передається.

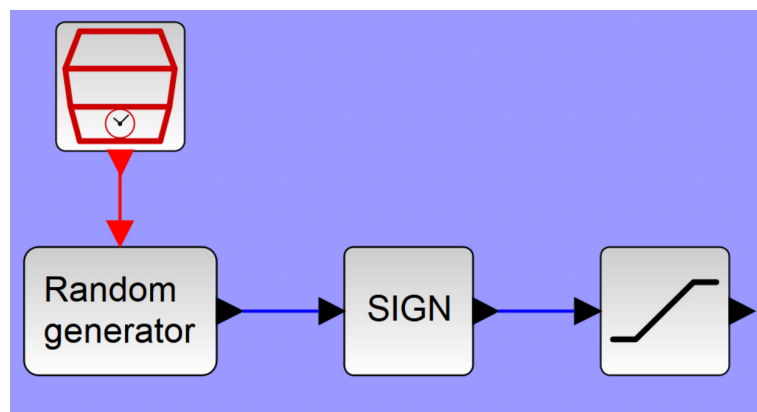


Рис.1.7 – Блок-схема джерела цифрових сигналів

Для створення блок-схеми потрібно використати такі палітри блоків:

Блок «*RAND\_m*» із палітри *Джерела сигналів*, використовується для отримання випадкових чисел, розподілених за рівномірним законом. Параметри блоку показані на рисунку 1.8. База – числа, що використовуються для ініціалізації машинного генератора псевдовипадкових чисел. Перше значення відноситься до дійсної, а друге – до уявної частини вихідного сигналу.



|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 12                                |

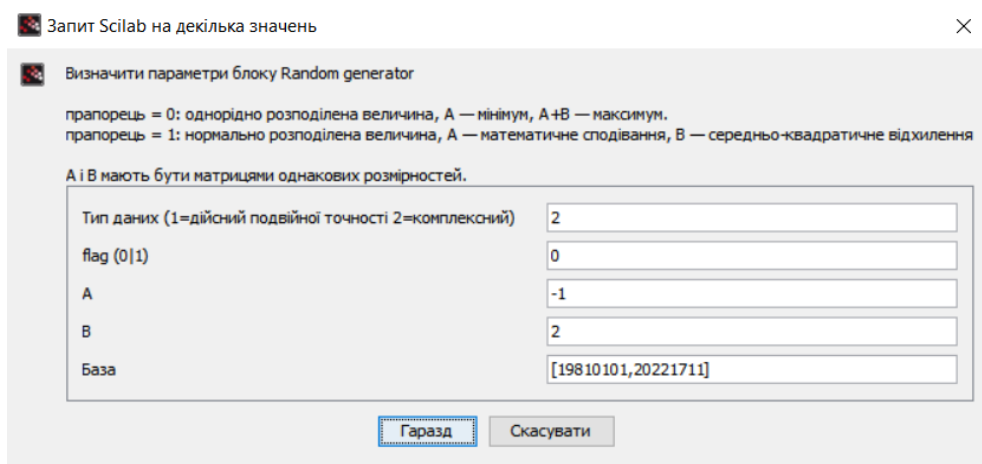


Рис.1.8 – Параметри блоку *RAND\_m*

Блок «*SIGNUM*» із палітри *Математичні операції* реалізує знакову функцію:

$$sign(x) = \begin{cases} -1, & x < 0; \\ 0, & x = 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (1.15)$$

Таким чином, усі числа в діапазоні  $(-1, 0)$  з виходу генератора будуть перетворені в  $-1$ , а числа в діапазоні  $(0, 1)$  – в  $+1$ . Нуль на виході генератора перетворюється на  $0$ , що небажано. Однак, ймовірність цієї події настільки мала, що їм можна знехтувати. Імовірності  $-1$  та  $+1$  у СТС рівні, оскільки інтервали  $(-1, 0)$  та  $(0, 1)$  мають однакову довжину для отримання випадкових чисел, розподілених за рівномірним законом. Параметри блоку показані на рисунку 1.9.

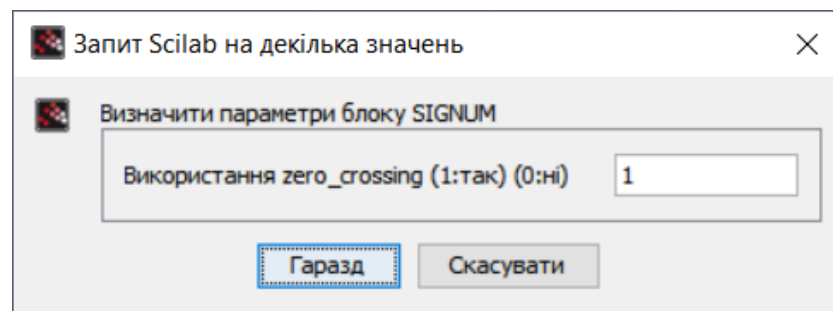


Рис.1.9 – Параметри блоку *SIGNUM*

Блок «*SATURATION*» із палітри *Розриви*, накладає верхню та нижню межі на сигнал. Параметри блоку показані на рисунку 1.10.

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 13                                |

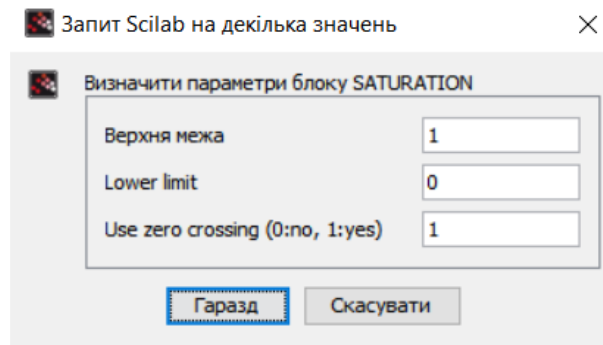


Рис 1.10 – Параметри блоку *SATURATION*

Блок «*SampleCLK*» із палітри *Джерела сигналів*, використовується для періодичної активації джерела випадкових чисел із заданим часовим інтервалом. Параметри блоку показані на рисунку 1.11.

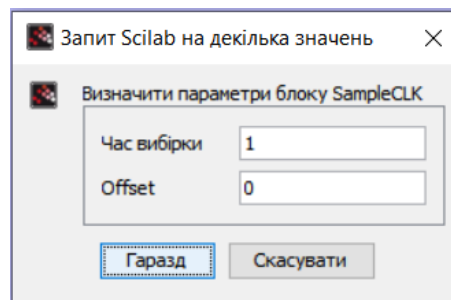


Рис 1.11 – Параметри блоку *SampleCLK*

**Осцилограф.** Блок-схема (рис.1.12) для реєстрації результатів побудована із блока «*CSCOPE*» (палітра *Пристрої реєстрації*) та блоку «*SampleCLK*».

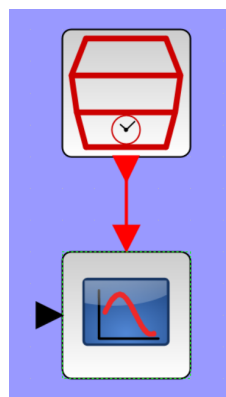


Рис.1.12 – Блок-схема реєстрації результатів

Параметри блоків показані на рисунку 1.13.

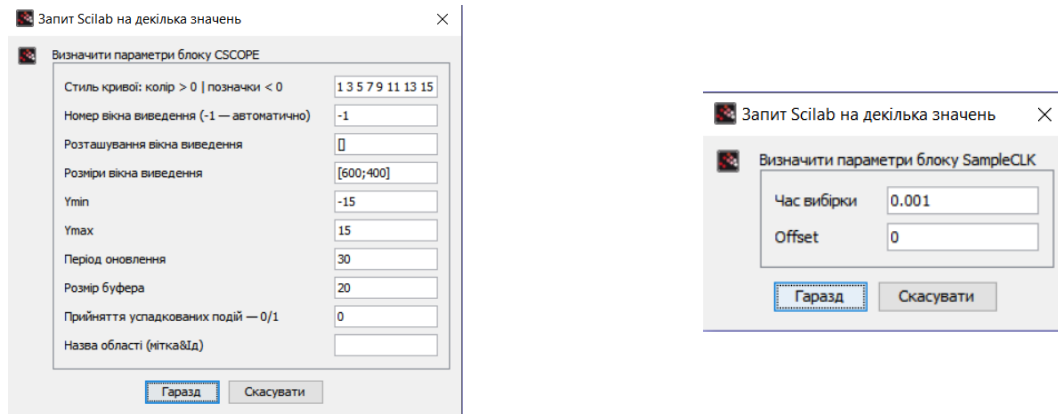


Рис.1.13 – Параметри блоків *CSCOPE* і *SampleCLK*

**Лінійний канал зв'язку.** Необхідно використати його фізичні моделі у вигляді RC-фільтра нижніх та верхніх частот. Для реалізації фізичної моделі використано блок «*CLR*» із палітри *Неперервні динамічні системи*. Параметри блока показані на рисунку 1.14, для випадку – RC-фільтр нижніх частот.

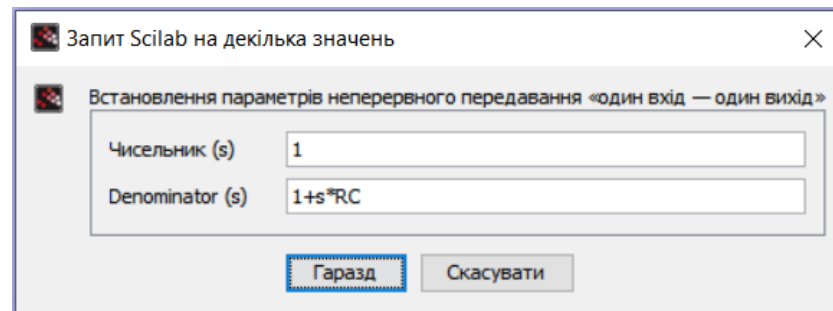


Рис.1.14 – Параметри блока *CLR* для випадку – RC-фільтр нижніх частот, де RC – стала часу

Остаточна модель системи для дослідження показано на рисунку 1.15.

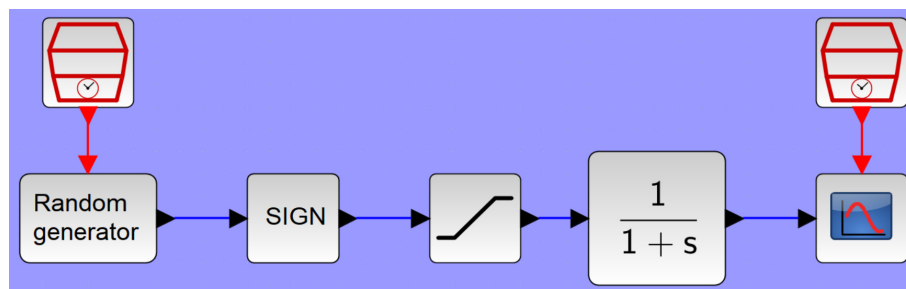


Рис. 1.15 – Модель системи для дослідження

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Житомирська політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                         | Екземпляр № 1   | Арк 43 / 15                                |

**Завдання 2.** Виконайте дослідження змін у часовому представленні цифрового сигналу на виході каналу зв'язку, який обмежує його спектральну характеристику в області *верхніх* частот. Для цього:

2.1. Визначить верхню частоту спектральної характеристики цифрового сигналу з умови:

$$f_{\text{в}} = \frac{20}{\tau_{\text{т.і}}}, \quad (1.16)$$

де  $\tau_{\text{т.і}}$  – тривалість двійкового імпульсу.

2.2. Визначить верхню межу смуги пропускання каналу зв'язку, фізичною моделлю якого є RC-фільтр нижніх частот. Виміряйте для трьох варіантів реалізації RC-фільтра.

2.3. Зобразить осцилограми, які показують зміни в часовому представленні цифрового сигналу за трьох значень смуги пропускання каналу зв'язку.

**Завдання 3.** Дослідіть зміни в часовому представленні цифрового сигналу на виході каналу зв'язку у разі обмеженої його спектральної характеристики в області *нижніх* частот.

3.1. Визначить нижню границю смуги пропускання каналу зв'язку, фізичною моделлю якого є RC-фільтр верхніх частот. Виміряйте для трьох варіантів реалізації RC-фільтра.

3.2. Зобразить осцилограми, які показують зміни в часовому представленні цифрового сигналу за трьох значень смуги пропускання каналу зв'язку.

#### 4. Контрольні запитання для формування висновків

7.1. Які характерні зміни отримує цифровий сигнал у разі обмеження його спектральної характеристики в області верхніх та нижніх частот?

7.2. Що і як треба враховувати, приймаючи цифровий сигнал, у якого канал зв'язку подавляє частину його спектральної характеристики?

7.3. На основі отриманих знань спробуйте зобразити осцилограму цифрового

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| Житомирська<br>політехніка | МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ<br>ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»<br>Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 | Ф-22.06-<br>05.01/172.00.1/Б/ОК16-<br>2022 |
|                            | <i>Екземпляр № 1</i>  | <i>Арк 43 / 16</i>                         |

сигналу після обмеження його спектральної характеристики одночасно в області верхніх та нижніх частот.

7.4. Які нові практичні знання і вміння отримали Ви після виконання цієї лабораторної роботи.