

С.В. Клименко, А.О. Лантушенко

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ЦИФРОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНИХ НЕСИСТЕМАТИЧНИХ КОДІВ

*Анотація.* На основі аналізу можливостей підвищення завадостійкості каналів зв'язку, розроблена інформаційна технологія використання рекурентних несистематичних кодів, яка дозволяє виявляти та виправляти одиночні та двійні помилки.

*Ключові слова:* завадостійкість, рекурентні несистематичні коди, нерекурсивний фільтр, перешкода в каналі зв'язку, детектор помилок.

**Постановка задачі.** Із-за наявності перешкод в каналах зв'язку, відбувається перекручення цифрових даних, що може привести, особливо в космічних системах зв'язку, до катастрофічних наслідків. Серед методів захисту від помилок найбільшого поширення набуло перешкодостійке кодування, яке дозволяє отримати високі якісні показники роботи систем зв'язку. Його основне призначення – вживання всіх можливих заходів для того, щоб ймовірність перекручень інформації була досить малою не дивлячись на присутність перешкод або збоїв в роботі мережі.

Питання підвищення завадостійкості цифрових систем зв'язку є предметом дослідження багатьох вчених, а саме: Бикова М.М. [1], Борисенко О.А. [2], Василенко С.В. [3], Ратайчука І.А. [4], Тоцького А.В. [5], та ін. Але, метод захисту інформації від помилок, що виникають в каналі зв'язку, використовуючи перешкодостійкі рекурентні несистематичні коди, нині є недостатньо висвітленим. Саме тому, тема даної статті є актуальною у зв'язку з тим, що головна особливість застосування рекурентних несистематичних кодів полягає в можливості виявлення і виправлення перекручувань сигналу, що виникли в процесі його передачі.

Задачі, які розглянуті та вирішені у данній статті: 1) розроблена функціональна схема системи передачі інформації з використанням рекурентних несистематичних кодів; 2) описаний алгоритм робо-

ти системи передачі інформації, використовуючи несистематичне кодування з передавальними функціями фільтрів  $H_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-4}$  і  $H_2(z) = 1 + z^{-3} + z^{-4}$ ; 3) розроблено програмне забезпечення для інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку; 4) досліджена працездатність інформаційної технології при помилках типу білого дискретного шуму з заданою інтенсивністю перекручень ( $p = 0.01$ ;  $p = 0.02$ ;  $p = 0.03$ ;  $p = 0.04$ ;  $p = 0.05$ ).

Відомо, що при збільшенні кількості виправлених помилок складність апаратури підвищується, а ефект від виправлення помилок несуттєвий, так як вони зустрічаються з маленькими ймовірностями. Тому, у статті були розглянуті тільки одиночні і подвійні помилки, а саме, помилки виду: 10, 01, 11, 011, 101, 0101, 1001, 01001, 10001, 010001, 100001, 0100001, 1000001, 01000001, 10000001, 010000001.

**Система передачі інформації з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів.** Завадостійкість повідомлення забезпечується шляхом надання йому надлишковості (перевірочних символів). Найбільш раціонально надлишковість використовується при використанні завадостійких кодів.

Рекурентні (згортальні) коди використовуються для кодування безперервної послідовності двійкових символів шляхом введення в цю послідовність спеціальних перевірочних символів [6].

Для кожного інформаційного символу вихідної послідовності формується спеціальний перевірочний символ, так що закодований сигнал можна записати у вигляді  $Si(1) Sp(2) Si(3) Sp(4) Si(5) Sp(6) \dots Si(2k-1) Sp(2k) \dots$ , де  $k$  – номер вихідних інформаційних символів.

Тут всі непарні тактові номери відносяться до інформаційних символів, всі парні – до перевірочних. Рекурентні коди такого типу називаються систематичними.

Згортальні двійково-кодові сигнали можна сформувати, перетворивши двома цифровими нерекурсивними фільтрами вихідну послідовність  $S(k)$ . Рекурентні коди такого типу називаються несистематичними.

Формувач складається з двох нерекурсивних фільтрів с дискретними передавальними функціями та пристрою перетворення двох паралельних сигналів в одну послідовність [7].

Якщо дискретні передавальні функції фільтрів дорівнюють  $H_1(z) = Q_1(z)$ ,  $H_2(z) = Q_2(z)$ , то  $z$ -перетворення вихідного сигналу дорівнює

$$S_1(z) = S(z) Q_1(z), S_2(z) = S(z) Q_2(z).$$

Розглянемо найпростіший формувач з передавальними функціями фільтрів:

$$H_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2}, H_2(z) = 1 + z^{-2}.$$

Структурна схема такого формувача зображена на рисунку 1.

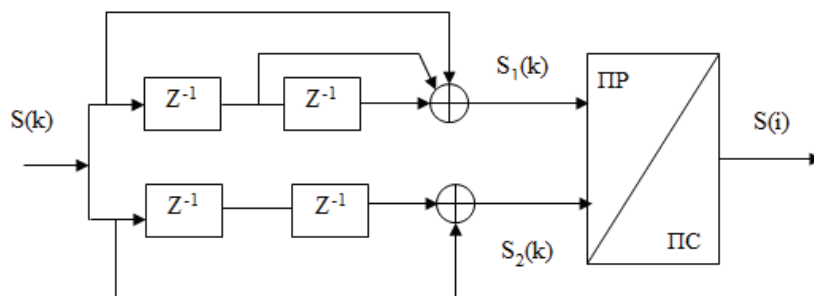


Рисунок 1 – Формувач несистематичних кодів з передавальними функціями фільтрів

Процес формування описується різницевиими рівняннями

$$S_1(k) = S(k-2) \oplus S(k-1) \oplus S(k),$$

$$S_2(k) = S(k-2) \oplus S(k).$$

Для дослідження перешкодостійких несистематичних кодів розглянемо функціональну схему цифрової системи зв'язку (рис. 2).

У моделі джерела повідомлення формується повідомлення з шістдесяти чотирьох знаків  $Z_j$ .

Дані моделі джерела повідомлення поступають до формувача інформаційних кодів, у якому кожному знаку повідомлення  $Z_j$  ставиться у відповідність кодова комбінація  $S_j(k)$ , яка міститься у банку кодів і складається з восьми символів (чотирьох нулів і чотирьох одиниць). Сформовані інформаційні коди надходять до блоку інформаційних кодів, де вони запам'ятовуються.

Отримані інформаційні кодові комбінації  $S_j(k)$  поступають до формувача перешкодостійких кодів, де відбувається перетворення вихідних кодових комбінацій  $S_j(k)$  двома цифровими нерекурсивними фільтрами з передавальними функціями  $H_1(z)$  і  $H_2(z)$  відповідно. Отримані кодові комбінації  $S_{j1}(k)$  та  $S_{j2}(k)$  поступають на блок паралельно-последовного перетворення. Таким чином, формується перешкодостійка послідовність кодових символів  $S(i)$ , у якій на всіх

непарних позиціях знаходяться інформаційні символи, а на парних – перевірочні. Послідовність кодових символів  $S(i)$  передається по каналу зв'язку, який піддається дії зовнішніх завад  $\square(i)$ . Тобто, вихідні дані з блоку паралельно-послідовного перетворення підсумовуються по модулю два з перешкодами:  $x(i)=S(i)+\zeta(i)$ . У якості перешкоди використовується дискретний білий шум.

Перекручена послідовність символів  $x(i)$  поступає на блок послідовно-паралельного перетворювання, яка розділяється на дві послідовності:  $x_1(k)$  – непарні позиції послідовності  $x(i)$ ,  $x_2(k)$  – парні позиції. Отримані послідовності  $x_1(k)$  та  $x_2(k)$  поступають до формулатора синдрому та на суматор по модулю два. Синдром  $C(k)$  поступає до формулатора сигналу перешкоди, в якому формується послідовність для виправлення інформаційного сигналу. У блок виправлення помилки надходить сформований сигнал перешкоди  $\zeta^*(k)$  та сигнал  $x(k)=x_1(k)+x_2(k)$ . На виході даного блоку отримуємо послідовність двійкових символів  $S^*(k)$ .

У блок декодування надходить виправлена послідовність  $S^*(k)$  та інформаційні коди  $S_j(k)$ . Після чого відбувається декодування, тобто кожний інформаційний код перетворюється на один з шістдесяти чотирьох знаків повідомлення  $Z_j$ .

У блоці обробки результатів відбувається порівняння початкової послідовності з виправленою для того, щоб визначити кількість неперекручених знаків, кількість перевернутих знаків і кількість виправлених знаків повідомлення.

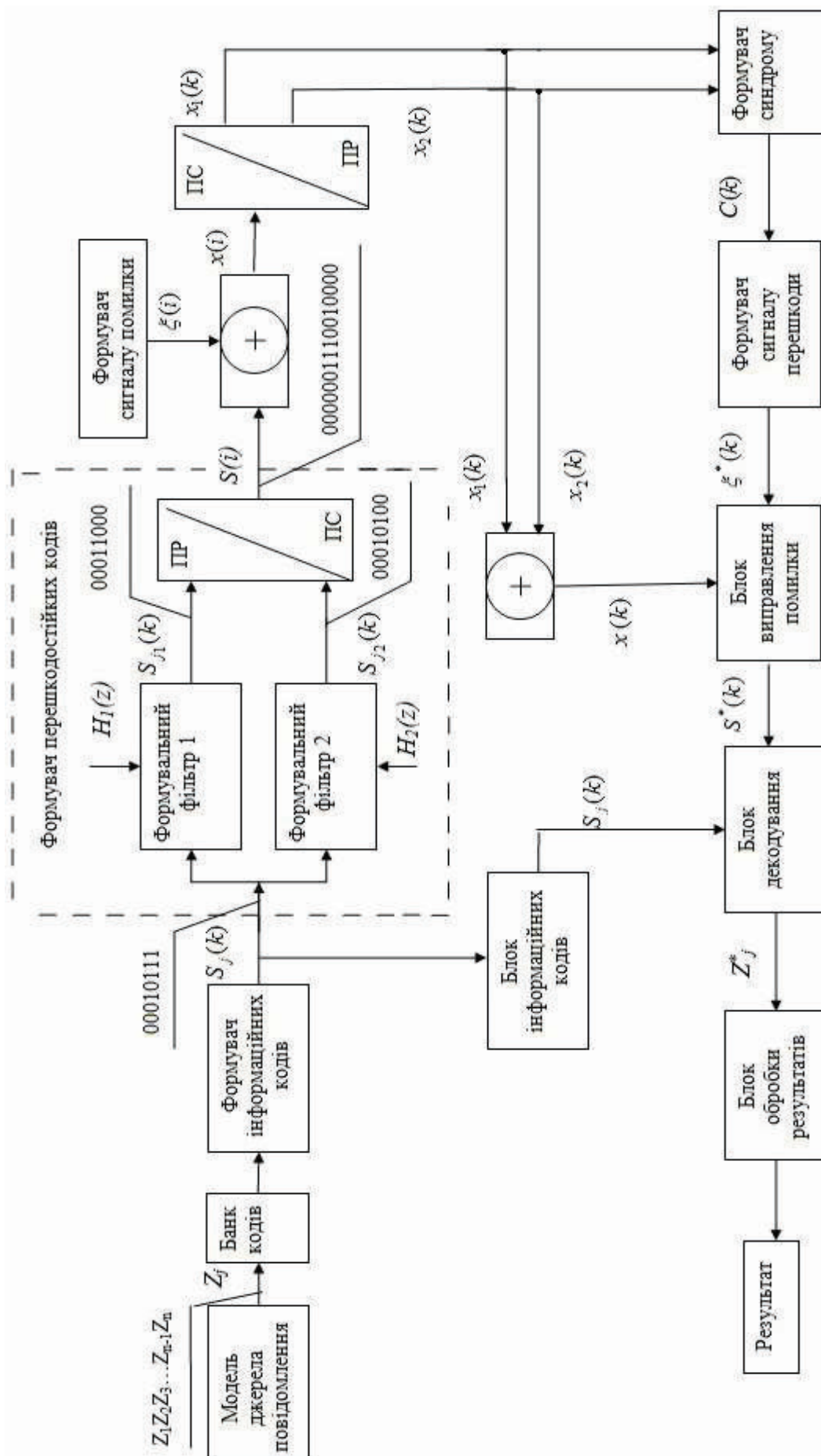


Рисунок 2 - Функциональна схема цифрового каналу зв'язку з використанням рекурентних несистематичних кодів.

**Алгоритми роботи системи передачі інформації з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів.**

1) Алгоритм формування повідомлень.

В комп'ютерній моделі даний алгоритм являється першим, згідно з яким кожному знаку повідомлення  $Z_j$  ставимо у відповідність восьми розрядний двійковий код  $S_j(k)$ , який складається з чотирьох нулів і чотирьох одиниць, а текст повідомлення, перетворюється на строку кодових символів.

2) Алгоритм формування перешкодостійких кодових комбінацій.

Якщо дискретні передавальні функції фільтрів дорівнюють  $H_1(z)=Q_1(z)$  і  $H_2(z)=Q_2(z)$ , то перетворення вихідних символів дорівнюють  $S_1(z)=S(z)\cdot Q_1(z)$ ,  $S_2(z)=S(z)\cdot Q_2(z)$ .

Розглянемо формувач з передавальними функціями  $H_1(z)=1+z^{-1}+z^{-2}+z^{-4}$  і  $H_2(z)=1+z^{-3}+z^{-4}$ .

Процес формування описується різницеvими рівняннями (1)

$$s_1(k) = s(k) \oplus s(k-1) \oplus s(k-2) \oplus s(k-4), \quad (1)$$

$$s_2(k) = s(k) \oplus s(k-3) \oplus s(k-4).$$

3) Алгоритм формування сигналу помилки.

Перешкоди, які діють в каналі зв'язку, будемо розглядати як дискретний білий шум. За допомогою генератора рівномірно розподілених випадкових чисел на інтервалі від 0 до 1 генерується послідовність  $r(i)$ , та формується послідовність  $\zeta(i)=\text{sgn}[p-r(i)]$ .

4) Алгоритм блоку перекручення сигналу.

У блоці перекручення інформації відбувається складання за модулем два перешкодостійкої послідовності з сигналом перешкоди. Тобто  $x(i)=S(i)+\zeta(i)$ . Таким чином, перекручення в перешкодостійкій послідовності  $S(i)$  будуть на тих позиціях коду, де сигнал перешкоди дорівнює одиниці.

5) Алгоритм блоку ПС/ПР перетворення

Послідовність  $x(i)$ , яка поступає на вхід блоку ПС/ПР перетворення, розділяється на дві паралельні послідовності  $x_1(k)=x(2k-1)$ ,  $x_2(k)=x(2k)$ . Отже, можна записати

$$x_1(k) = s_1(k) \oplus \xi_1(k) \quad x_2(k) = s_2(k) \oplus \xi_2(k)$$



6) Алгоритм блоку формування синдрому

Запишемо z-перетворення сигналів  $x_1(k)$  та  $x_2(k)$ :

$$x_1(z) = S(z) \cdot Q_1(z) \oplus \xi_1(z), \quad x_2(z) = S(z) \cdot Q_2(z) \oplus \xi_2(z).$$

Перетворимо прийняті сигнали  $x_1(k)$  та  $x_2(k)$  фільтрами з передавальними функціями  $H_1(z)=Q_2(z)$  і  $H_2(z)=Q_1(z)$ .

Їх z-перетворення дорівнюють

$$Y_1(z) = Q_2(z) \cdot x_1(z) = S(z) Q_1(z) Q_2(z) \oplus Q_2(z) \xi_1(z),$$

$$Y_2(z) = Q_1(z) \cdot x_2(z) = S(z) Q_1(z) Q_2(z) \oplus Q_1(z) \xi_2(z).$$

Сума  $Y_1(z)$  та  $Y_2(z)$  дорівнює синдрому (2)

$$C(z) = Q_2(z) \cdot \xi_1(z) \oplus Q_1(z) \cdot \xi_2(z) \quad (2)$$

7) Алгоритм блоку формування сигналу перешкоди.

Помножимо (2) на  $z^{-4}$ . Сигнали  $C(z) \cdot z^{-4}$  та  $C(z)$  подамо на схему збіжності

$$A(z) \cdot z^{-i} (I \ I) A(z) \cdot z^{-j} = L(z) = \begin{cases} A(z) \cdot z^{-j}, & j = i; \\ 0, & j \neq i \end{cases}$$

Позначивши  $\xi_1(z) + \xi_2(z) = \xi(z)$ , одержимо

$$C(z) \cdot z^{-4} = \xi(z) \cdot z^{-4} \oplus \xi_1(z) \cdot z^{-5} \oplus \xi_1(z) \cdot z^{-6} \oplus \xi_2(z) \cdot z^{-7} \oplus \xi(z) \cdot z^{-8},$$

$$L(z) = C(z) (I \ I) C(z - 4) = \xi(z) \cdot z^{-4} = \xi^*(z).$$

8) Алгоритм блоку виправлення помилок.

Запишемо z-перетворення суми сигналів  $x_1(k)$  та  $x_2(k)$ :

$$x(z) = x_1(z) \oplus x_2(z) = S(z) [Q_1(z) \oplus Q_2(z)] \oplus \xi_1(z) \oplus \xi_2(z).$$

Отже, z-перетворення оцінки сигналу буде дорівнювати  $S^*(z) = x(z) \cdot z^{-4} \oplus L(z)$ .

Побудуємо детектор помилок шляхом формування поточних значень кодових відстаней синдрому  $C(k)$  із синдромами перекручувань  $C_j(k)$ ,  $j=1...16$ :

$$d_j(k) = \sum_{i=0}^7 [C_j(8-i) \oplus C(k-i)].$$

Якщо на виході вимірника кодових відстаней поставити граничні пристрої прийняття рішень

$$R_j(k) = \text{sgn}[0,5 - d_j(k)],$$

то при  $d_j(k)=0$   $R_j(k)=1$ . У цьому випадку формується оцінка  $\xi_j^*(k)=\xi_1^*(k)+\xi_2^*(k)$ , що надходить на суматор за модулем 2. Також на цей суматор подається затриманий на 7 тактів сигнал  $x(k)$ . Таким чином, детектор помилок складається з вимірників кодових відстаней (ВКВ), граничних пристроїв (ГП) і формувачів кодів помилок (ФП).

Модель каналу зв'язку з модернізованим детектором помилок зображена на рисунку 3.

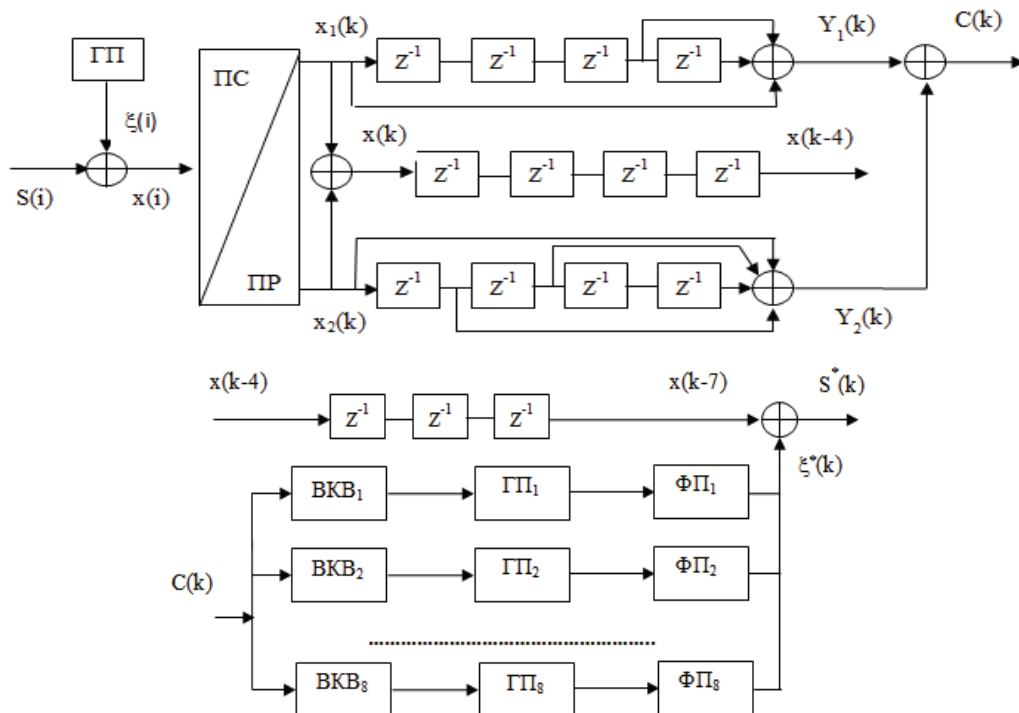


Рисунок 3 – Модель каналу зв'язку на основі рекурентних несистематичних кодів з модернізованим детектором помилок

Вимірник кодових відстаней здійснює функцію порівняння синдрому помилки з заданим синдромом. Якщо синдроми рівні, то спрацьовує пороговий пристрій і формувач помилки видає відповідний помилці сигнал, який і дає виправлення перекрученій кодовій комбінації. Таким чином, спроектований детектор помилок виправляє усі обрані види перекручень.

#### 9) Алгоритм блоку декодування.

Згідно з банком інформаційних кодів  $S_j(k)$  відбувається декодування отриманої виправленої послідовності  $S^*(k)$ , тобто кожний інформаційний код перетворюється на один з шістдесяти чотирьох знаків повідомлення  $Z_j$ .



**Інформаційна технологія завадостійкого цифрового зв'язку.** На основі функціональної схеми системи передачі інформації з використанням рекурентних несистематичних кодів розроблено програмне забезпечення інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку. На початку роботи вводяться значення кількості знаків повідомлення, що необхідно передати, та задається ймовірність появи помилки в каналі зв'язку. Наприклад,  $N=1000$  та  $p=0.01$  (рис.4).

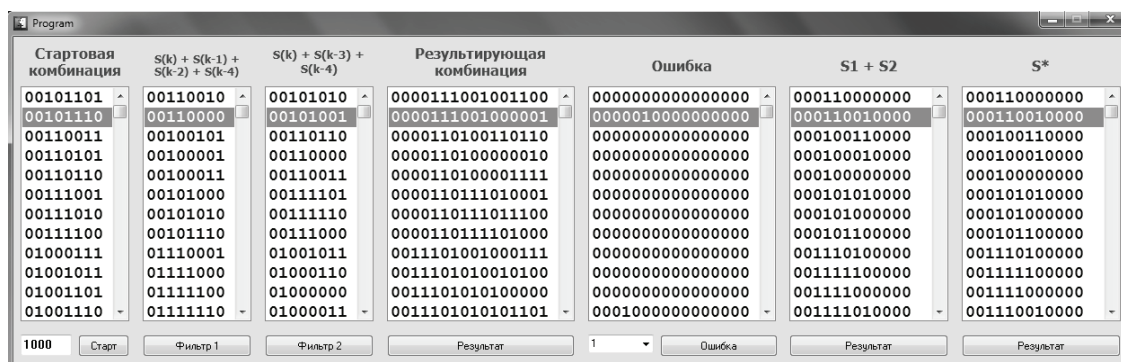


Рисунок 4 – Комп'ютерна програма інформаційної технології завадостійкого цифрового зв'язку

Після введення необхідних значень необхідно натиснути на кнопку «Старт» та будуть сформовані знаки повідомлення  $Z_j$ .

При натяті кнопок «Фильтр1» та «Фильтр2» будуть сформовані інформаційні коди  $S_1(k)$  та  $S_2(k)$ , що відповідає процесу перетворення вихідного сигналу через цифровий нерекурсивний фільтр 1 та фільтр 2 з передавальними функціями  $H_1(z)$  і  $H_2(z)$  відповідно.

Для того, щоб отримати завадостійкі коди  $S(i)$  для кожного знаку повідомлення, необхідно натиснути на кнопку «Результат».

Далі необхідно отримати сигнал перешкоди  $\xi(i)$ , що буде діяти в каналі зв'язку, нажав на кнопку «Ошибка».

Аналізуючи рисунок 5, можна зробити висновки, що при наявності сигналу помилки в каналі зв'язку  $\xi(i) = 0000010000000000$ , інформаційний сигнал  $S^*(k)$  був прийнятий правильно, тобто помилка була виправлена.

**Експериментальна перевірка роботи інформаційної технології.** Розглянемо процес відновлення сигналу, використовуючи модель каналу зв'язку з модернізованим детектором помилок. У таблиці 1 міститься порахований синдром для перекручення виду

$\xi(i)=1010000000000000$ . Знайдемо поточні значення кодових відстаней  $d_j(k)$  для отриманого синдрому.

Таблиця 1

Значення кодових відстаней для синдрому  $C(k)=110101000$ .

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C(k)	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d(k)	4	5	3	5	4	4	6	0	5	3	2	4	2	3	3	3

Як впливає з даних таблиці 1, кодова відстань дорівнює нулю у випадку  $d(8)=0$ , коли збурення мають вигляд  $\xi(i)=1010000000000000$  і сума збурень за першим і другим каналами  $\xi^*(k)=110$ .

У таблиці 2 поданий процес виправлення помилки за рахунок перекручувань виду  $\xi(i)=1010000000000000$  для інформаційного сигналу  $S(k)=00000000$ .

Таблиця 2

Процес відновлення сигналу для  $\xi(i)=1010000000000000$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S(k)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$x_1(k)$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$x_2(k)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x(k)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_4(k)$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$\xi^*(k)$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
$x(k-7)$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
$S^*(k)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Аналізуючи таблицю 2, помітно, що прийнятий сигнал  $S^*(k)$  співпадає з вихідним інформаційним сигналом  $S(k)$ , навіть при наявності помилки  $\xi(i)=1010000000000000$  в каналі зв'язку, тобто помилка була виправлена модернізованим детектором помилок.

**Висновки.** У даній статті було досліджено метод перешкодостійкого кодування на основі несистематичних рекурентних кодів. Побудована функціональна схема цифрової каналу зв'язку з використанням завадостійких рекурентних несистематичних кодів. На основі функціональної схеми розроблена комп'ютерна програма інформацій-

ної технології цифрового каналу зв'язку. Описано алгоритм роботи інформаційної технології системи зв'язку, а саме: формування повідомлення, формування перешкодостійкого кодування, перекручення перешкодостійкої двійково-кової комбінації, виявлення і виправлення перекручень, обробки результатів моделювання. Перевірена працездатність інформаційної технології шляхом проведення експериментів.

Отже, розроблена інформаційна технологія завадостійкості цифрового каналу зв'язку з використанням рекурентних несистематичних кодів дозволяє виявляти та виправляти одиночні та двійні помилки, що діють в каналі зв'язку.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Биков М.М. Метод підвищення пропускної здатності каналу передачі за рахунок використання потенціальних кодів / М.М. Биков, Т.В. Грищук, Н.О. Кучерук // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 201с.
2. Борисенко О.А. Завадостійка передача даних на базі факторіальних чисел / О.А. Борисенко, О.Є. Горячев // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 201с.
3. Василенко С.В. Модель забезпечення цілісності інформаційних об'єктів із застосуванням узагальненого завадостійкого коду умовних лишків / С.В. Василенко // Моделювання та інформаційні технології. – 2010. - №55. – С.29-33.
4. Ратайчук И.А. Исследование помехоустойчивости цифрового канала связи с использованием недвоичных кодов Рида-Соломона / И.А. Ратайчук, В.И. Шульгин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2011. - №1. – С.108-112.
5. Тоцкий А.В. Способ повышения помехоустойчивости цифровой системы связи на основе биспектрально-организованной модуляции / А.В. Тоцкий, В.В. Науменко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. - №2. – С.27-31.
6. Глухин В.И. Информационная безопасность и защита данных: учебное пособие / В.И. Глухин. – Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2011. – С.13.
7. Дронь М.М. Основи теорії захисту інформації: Навч. посіб. / М.М. Дронь, В.П. Малайчук, О.М. Петренко. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2001. – С.87.