

УДК 004.42; 004.052

В роботі описано програмну реалізацію математичної моделі надійності відновлюваної технічної системи з постійним навантаженням резервом. Розроблене програмне забезпечення (ПЗ) автоматизує формування математичної моделі надійності у вигляді системи рівнянь Колмогорова-Чепмена і дає змогу аналізувати показники надійності технічної системи для різних значень кратності резервування. Передбачено можливість візуалізації отриманих результатів обчислень

Ключові слова: програмне забезпечення, надійність, технічна резервована система

В работе изложено описание программной реализации математической модели надежности восстанавливаемой технической системы с постоянным нагруженным резервом. Разработанное программное обеспечение (ПО) автоматизирует формирование математической модели надежности в виде системы уравнений Колмогорова-Чепмена и позволяет анализировать показатели надежности технической системы для различных значений кратности резервирования. Предусмотрена возможность визуализации полученных результатов вычислений

Ключевые слова: программное обеспечение, надежность, техническая резервированная система

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ПОСТІЙНИМ НАВАНТАЖЕНИМ РЕЗЕРВОМ

Б. А. Мандзій

Доктор технічних наук, професор
Кафедра теоретичної радіотехніки та
радіовимірювань**

E-mail: bmandziy@polynet.lviv.ua

М. М. Сенів

Кандидат технічних наук, старший викладач*

E-mail: max1sudden@gmail.com

Б. М. Куць*

*Кафедра програмного забезпечення**

E-mail: bohdan.kuts@gmail.com

**Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С.Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Сучасні технічні системи виконують складні та відповідальні функції, тому обов'язковим аспектом їх проектування є надійнісний аспект, який являє собою комплекс взаємозв'язаних задач, спрямованих на оцінку та ефективне керування показниками надійності об'єктів проектування (ОП) з метою забезпечення потрібного чи можливого рівня надійності за умови збереження заданої функціональної поведінки. Особливістю надійнісного аспекту проектування є те, що в основі розвитку методів та способів дослідження надійності складних технічних систем лежить математичне моделювання, оскільки проведення натурних експериментів з реальними складними системами вимагає величезних матеріальних витрат, наявності дорогої вимірювальної апаратури та значних витрат часу, тому в багатьох випадках є неприйнятним. Важливою складовою математичного забезпечення надійнісного аспекту проектування технічних систем є математичні моделі надійності, під якими розуміють такий аналітично чи статистично представлений об'єкт, який відображає властивості системи з погляду надійності таким чином, що його дослідження дає повну інформацію про надійність системи. На практиці в більшості випадків моделювання проводять на основі відомих аналітичних методів [1 – 7] з використанням експериментальних даних про інтенсивності

відмов та інтенсивності відновлення елементів системи. Серед аналітичних методів найбільшого поширення набули методи, основані на теорії марковських процесів, які використовують моделі надійності у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена і дають змогу визначити часові залежності ймовірностей перебування системи у можливих станах (працездатності, відновлення, відмови тощо). Ці методи успішно застосовують для аналізу надійності різного типу технічних систем: відновлюваних і невідновлюваних, нерезервованих і резервованих при різних видах резервування, при різних пріоритетах ремонту тощо [1 – 6]. Проте основні труднощі при застосуванні згаданих методів полягають у тому, що сучасні технічні системи характеризуються надзвичайно великою кількістю можливих станів (порядку десятків-сотень тисяч), тому формування та аналіз їх математичних моделей вимагає використання комп'ютерних засобів. Своєю чергою, це зумовлює актуальність та практичну потребу розроблення відповідного програмного забезпечення орієнтованого на автоматизоване формування моделей надійності технічних систем та розв'язання задач надійнісного аспекту проектування. Незважаючи на те, що в даний час відомі спеціалізовані програми, призначені для проведення аналізу надійності технічних систем [2, 4, 8 – 10], проте залишаються актуальними задачі подальшого розширення їх функціональних можли-

востей, покращення сервісу користувача і, зокрема, задача удосконалення формалізації структури досліджуваних систем. У даній статті описано варіант програмної реалізації формалізованого опису структури та автоматизованої побудови моделі надійності у вигляді графа станів і переходів відновлюваної технічної системи з N-кратним навантаженим резервуванням. Відновлення здійснює ремонтний орган за прямим пріоритетом. Кількість відновлень необмежена.

2. Формування математичної моделі надійності

На рис. 1 зображена структурна схема системи з постійним навантаженим резервом.

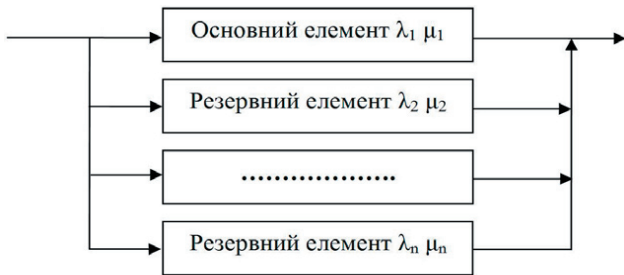


Рис. 1. Структурна схема резервованої системи

Кожен елемент системи характеризується своєю інтенсивністю відмов λ_i та інтенсивністю відновлень μ_i . Система нормально функціонує, якщо працездатним є хоча б один елемент. При відмові будь-якого елемента ремонтний орган відновлює його, або цей елемент стає в чергу на відновлення, якщо ремонтний орган зайнятий відновленням іншого елемента, що відмовив раніше.

Якщо відмовляють усі елементи системи, то вона переходить до стану простою, з якого вийде після закінчення відновлення елемента, який відмовив першим. Із сказаного випливає, що стан системи визначається станами її елементів. Кількість усіх можливих станів C системи в загальному випадку визначається сумою усіх можливих розміщень із загального числа N елементів по n елементів, які відмовили:

$$C = \sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)!} \quad (1)$$

Своєю чергою, елементи системи можуть перебувати в таких станах: F - Своєю чергою, елементи системи можуть перебувати в таких станах: F - працездатності (нормального функціонування); R- відновлення (ремонт); ORk - очікування на ремонт з вказанням номера черги (k = 1,...,N-1). Згідно з правилом функціонування системи можливі такі переходи між станами елементів: F > ORk > OR(k-1) >...R(1) > R > F. Базовими подіями, які спричиняють переходи системи з одного стану до іншого, є відмови та завершення ремонту окремих елементів.

Для прикладу розглянемо формування математичної моделі надійності системи з двократним резервуванням (загальна кількість елементів N=3). Згідно з (1) кількість можливих станів системи дорівнює 16. Інформація про стани елементів та стани системи, що відповідають їм, представлена у матриці станів, розмірність якої дорівнює (N+1) x C, і яка має наступний вигляд:

	0	1	2	3	12	13	21	23	31	32	123	132	213	231	312	321
Елемент 1	F	R	F	F	R	R	OR1	F	OR1	F	R	R	OR1	OR2	OR1	OR2
Елемент 2	F	F	R	F	OR1	F	R	R	F	OR1	OR1	OR2	R	R	OR2	OR1
Елемент 3	F	F	F	R	F	OR1	F	OR1	R	R	OR2	OR1	OR2	OR1	R	R
Система	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	R	R	R	R	R	R

Кодування стовпців матриці (станів системи) виконане так, що в ньому відображені номери елементів, які відмовили, та послідовність їх відмов, оскільки це важливо для заданого пріоритету відновлення. Наприклад, станові 32 відповідає ситуація, коли відмовили два елементи : спочатку третій, а відтак другий.

Стан системи S (нижній рядок матриці) можна описати з урахуванням станів елементів такою умовою:

S = R, якщо одночасно усі елементи перебувають у станах R або OR, у протилежному випадку S = F.

Перехід системи з одного стану до іншого визначається можливими переходами між станами елементів, вказаними раніше. Цю інформацію зручно подати у вигляді матриці переходів П, розмірність якої дорівнює розмірності матриці станів. Елемент P_{ij} матриці переходів (тут j -номер стовпця матриці, починаючи з нуля) є кодом стану, до якого переходить система із стану S_j внаслідок зміни стану i-го елемента (i = 1,2,3; j =0,1,...,16). Формування матриці П здійснюється порівнянням усіх стовпців матриці станів C з урахуванням можливих переходів між станами елементів.

Наприклад, порівнюючи стани 3 та 32, бачимо, що система перейде із стану 3 до стану 32 внаслідок відмови елемента 2, коли ще не закінчений ремонт елемента 3, тому елемент 2 стає в чергу на ремонт.

Матриця переходів має вигляд:

Із стану	0	1	2	3	12	13	21	23	31	32	123	132	213	231	312	321
Ел.1	1	0	21	31	2	3		231		321	23	32				
Ел.2	2	12	0	32		132	1	3	312				13	31		
Ел.3	3	13	23	0	123		213		1	2					12	21
Сист.	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	R	R	R	R	R	R

Із матриці переходів випливає, що в даній системі можливі 30 переходів між станами. Перехід із стану з меншим кодовим числом до стану з більшим кодовим числом означає відмову відповідного елемента, а перехід від стану з більшим кодовим числом до стану з меншим кодовим числом означає закінчення ремонту відповідного елемента. На підставі матриці переходів можна побудувати граф станів та переходів, зображений на рис. 2.

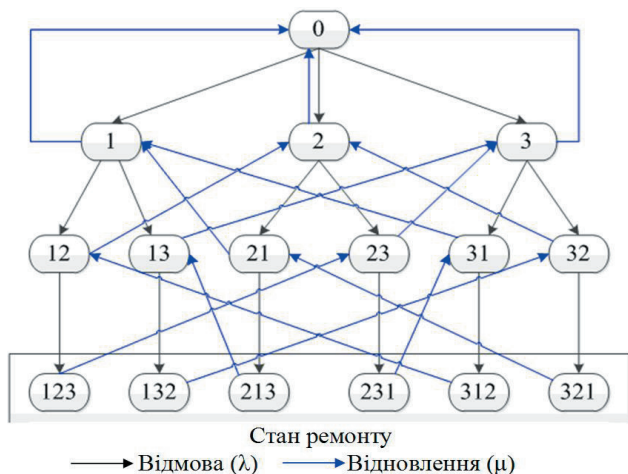


Рис. 2. Граф станів та переходів системи з двократним резервуванням

Отримана інформація є достатньою для формування математичної моделі надійності об'єкта дослідження у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена виду [5]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t)P_i(t) + \sum_{j=1}^N \lambda_{ji}(t)P_j(t); i, j = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

де $P_i(t)$, $P_j(t)$ - імовірності перебування технічної системи в момент часу t відповідно у станах x_i та x_j ;

$\lambda_{ij}(t)$ - інтенсивність переходу із стану x_i у стан x_j ;

$\lambda_{ji}(t)$ - інтенсивність переходу із стану x_j у стан x_i ;

N - кількість можливих станів системи.

3. Програмна реалізація моделі надійності системи

В межах даної роботи програмно реалізовано модель надійності технічної системи з постійним резервом змінної кратності та ремонтним органом з прямим пріоритетом. Даний програмний продукт призначений для визначення часових залежностей ймовірностей пе-

ребування системи в можливих станах (нормального функціонування або ремонту) і розрахунку ймовірності безвідмовної роботи протягом заданого інтервалу часу. Головна його мета – надати користувачу простий та зрозумілий інструментарій для автоматизованого розрахунку характеристик надійності заданої моделі системи при різних вхідних даних: кількості елементів системи, інтенсивності відмов та відновлення для кожного з елементів, часового діапазону опрацювання. Окрім цього, він включає засоби візуалізації результатів моделювання. В ході проектування даної програмної реалізації було визначено послідовність роботи програми після отримання вхідних даних та вказівки на виконання. Дана послідовність виконання приведена на рис. 3.

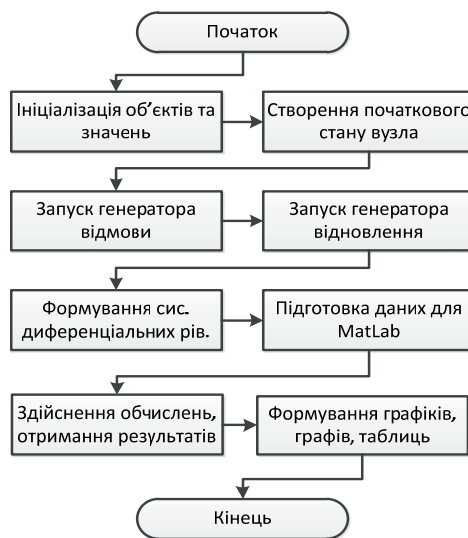


Рис. 3. Послідовність виконання програми після запуску обчислень

Програмний продукт являє собою Windows Forms Application, який можна виконувати в середовищі ОС Windows за умови, що встановлено бібліотеку MATLAB Compiler Runtime v.7.16, чи новішу. Зовнішній вигляд вікна інтерфейсу користувача наведено на рис. 4.

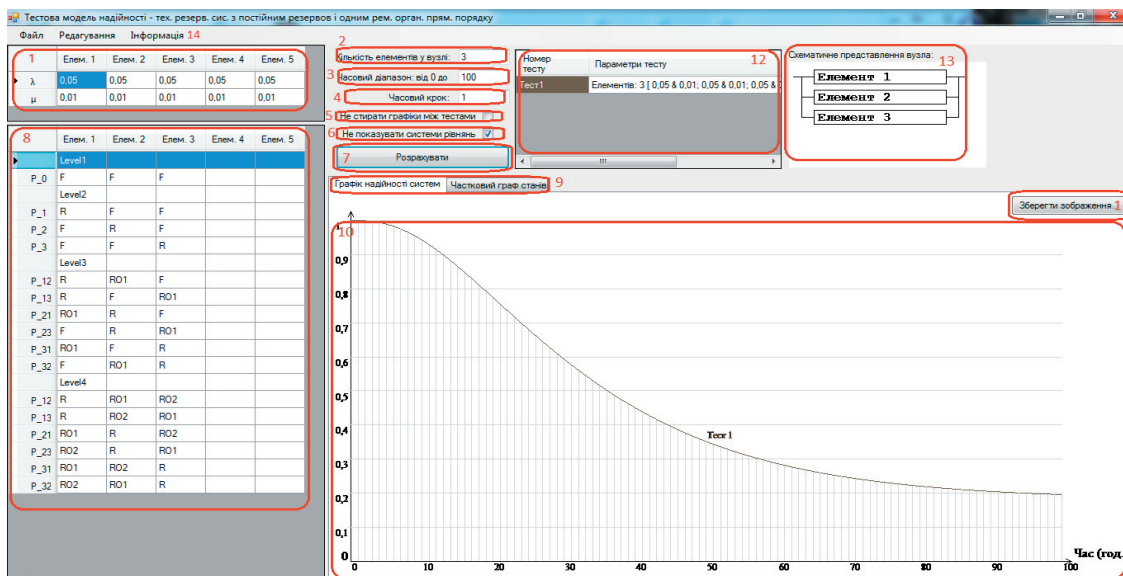


Рис. 4. Зовнішній вигляд вікна інтерфейсу користувача

Елементи інтерфейсу несуть таке функціональне навантаження:

- 1) список параметрів елементів системи (характеристик λ, μ);
- 2) визначення кількості елементів системи;
- 3) визначення часового проміжку, на якому буде здійснюватися розрахунок імовірності безвідмовної роботи;
- 4) визначення часового кроку, з яким буде формуватися графік часової залежності імовірності безвідмовної роботи;
- 5) пункт, який дозволяє зберігати графіки та параметри між різними тестами (при цьому пункти 3 та 4 блокуються і не можуть бути змінені);
- 6) пункт, який відповідає за показ вікна із системою диференціальних рівнянь в аналітичній формі;
- 7) кнопка запуску усіх обчислень та операцій;
- 8) список усіх станів системи, які були сформовані на основі введених даних;
- 9) вкладки, які дозволяють визначати часову залежність ймовірності перебування системи у вибраному стані;
- 10) місце для відображення графічного матеріалу;
- 11) кнопка для збереження вибраного графіка (чи групи графіків) у зовнішній файл у вигляді простого растрового зображення;
- 12) список проведених тестів та їх параметрів (очищається при кожному тесті якщо не включений пункт 5);
- 13) структурна схема системи, яка задана в останньому тесті (залежить від кількості елементів);
- 14) додаткові команди програми.

Для реалізації графічної складової, яка повинна представляти граф станів і переходів, було вибрано модель відображення графа частинами, оскільки при великій кількості станів нераціонально представляти весь граф, бо він стає просто нечитабельним. Хоча все ж існують альтернативні шляхи, які передбачають інші методи відображення графа, наприклад кругового.

Для прикладу використаємо граф з рис. 2, що побудований для системи із трьох елементів. На рис. 5 зображено фрагмент графа, який відображає зв'язки нульового стану з станами 1, 2, 3, де зеленим кольором

позначено переходи, які відповідають відновленням елементів (і відповідно використовують характеристику інтенсивності відновлення), а червоним - переходи, які відповідають відмовам елементів (відповідно використовують інтенсивності відмов).

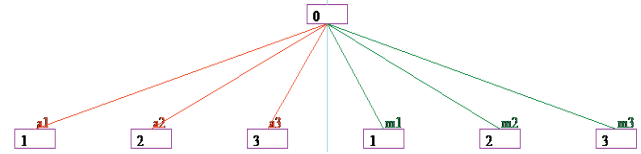


Рис. 5. Фрагмент графа для стану 0

На рис. 6 зображено фрагмент графа, який відображає зв'язки стану 23 з станами 2, 3, 123 та 231, з якими він зв'язаний такими переходами:

- 2 → 23 → 231 (внаслідок відмов елементів);
- 3 ← 23 ← 123 (внаслідок відновлень елементів).

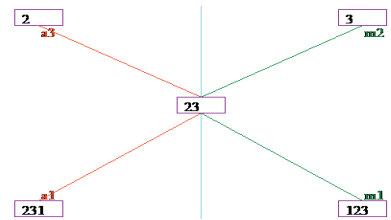


Рис. 6. Фрагмент графа для стану 23

Правильність відображення фрагментів графа станів та переходів підтверджує рис. 2, де відповідні стани там мають такі самі зв'язки. Ці зв'язки можна перевірити, знаючи логічні правила зміни станів, які закладені в модель, а саме: при відмові елемента його номер додається до кінця коду існуючого стану, а при відновленні елемента його номер усувається з початку коду стану (оскільки відновлення відбувається за прямим пріоритетом). На рис. 7 у вікні інтерфейсу показано приклад фрагмента графа для стану 4 системи, до складу якої входить 5 елементів. Застосовуючи ці правила, були перевірені і більш складні випадки, як наприклад дана рис. 7 (для системи з 5-ма елементами у вузлі).

Елем. 1	Елем. 2	Елем. 3	Елем. 4	Елем. 5
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Рис. 7. Фрагмент графа станів (система із 5 елементів)

Слід відзначити, що зі збільшенням кількості елементів суттєво збільшується кількість можливих станів системи та часові витрати на формування графа станів та переходів, що відображено в табл. 1, інформація в якій подана для випадку використання робочої станції з процесором Intel i7 2.2 ГГц, 8 Гб оперативної пам'яті, системним SSD диском зі швидкістю передачі 6 Gbit/sec).

Таблиця 1

Залежність кількості станів та часових витрат від кількості елементів

Кількість елементів у системі	Кількість станів	Час формування матриці станів, с.	Час формування повного графа, с
1	2	<1	<1
2	5	<1	<1
3	16	<1	<1
4	65	<1	<1
5	326	<1	<1
6	1957	<1	<1
7	13700	<1	2
8	109601	1.1	2хв. 1с.
9	986410	5.5	>30хв.

яке дозволяє нормально опрацьовувати лише до 13000 станів в системі, тобто формувати граф для системи із 6 елементів.

Часові витрати на розрахунок часових залежностей імовірності безвідмовної роботи системи предствалені в табл. 2 (при параметрах: 100-годинний діапазон з кроком в одну годину).

Графіки, отримані в програмі за цих досліджень приведені на рис. 8.

Таблиця 2

Витрати часу на розрахунок часових залежностей

Кількість елементів	Витрати часу до моменту отримання графіка, сек.
1	2
2	2,4
3	2,5
4	2,5
5	5,5

Самі ж графіки вказують на вірність отриманих результатів, оскільки ймовірність безвідмовної роботи системи з необмеженою кількістю відновлень ніколи не опускається до нуля, а з плином часу досягає якое певного значення – стаціонарного стану.

В результаті проведених досліджень було виявлено, що сформувати матрицю >980000 станів не є проблемою з точки зору затрат часу.

Проте сформувати граф станів та переходів таєважко – часові затрати сильно зростають за рахунок зростання кількості переходів, які використовуються при зв'язуванні графа за подією «відновлення».

Крім цього, для системи із 10 елементів починаємо отримувати помилки «недостачі пам'яті».

Проте цей поріг все ж більший, ніж при використанні матричного представлення (у прямому вигляді, без оптимізації розрідженості в матрицях),

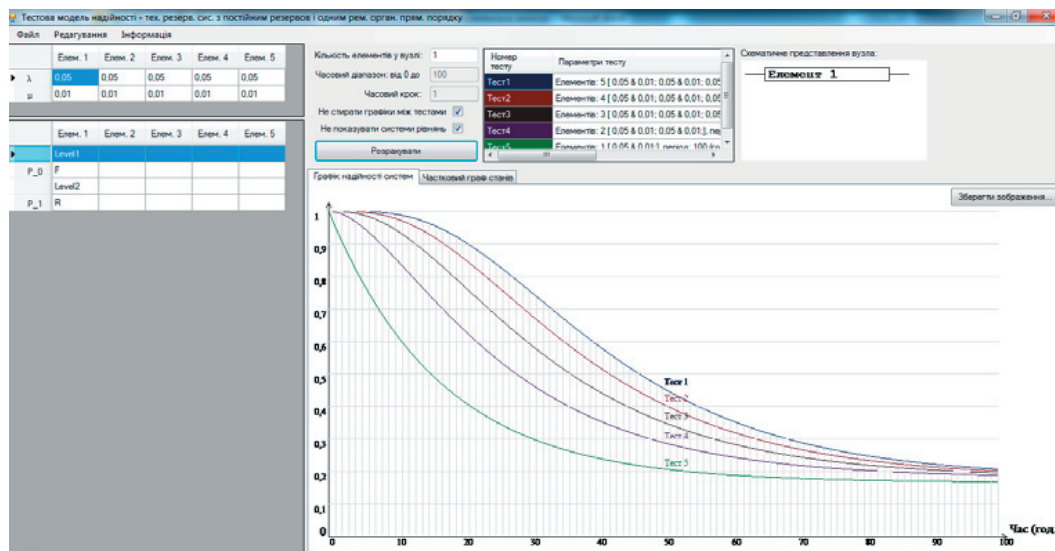


Рис. 8. Графіки часових залежностей ймовірності безвідмовної роботи для різної кількості елементів у системі (1–5)

5. Висновки

Розроблений програмний продукт може бути використаний спеціалістами радіоелектроніки та електротехніки, які займаються надійнішим проектуванням на системотехнічному рівні. Зокрема, він суттєво під-

вищує ефективність порівняльного аналізу альтернативних варіантів резервування технічних систем та вибору кращого за критерієм надійності.

В результаті проведених досліджень виявлено, що поточна версія програмного продукту цілком коректно і швидко моделює надійнісну поведінку систем,

кількість станів яких сягає 13000 (кратність резервування 5-6).

Якщо здійснити оптимізацію та усунути «витоки» пам'яті, то при даній апаратній конфігурації можливим є ефективне моделювання систем з кратністю резервування до 10.

Література

1. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Половко А. М. Основы теории надежности. Практикум / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
3. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем / К. Райншке // Пер.с нем. Под ред. д.т.н. проф.Б.А.Козлова. – Изд. "Мир", М: 1979,-452с.
4. Хенлі Е.Дж. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику / Е.Дж.Хенлі, Х.Кумамато // Пер. з англ. за ред. Ю.Г. Зареніна. – К.: Вища школа, гол. вид-во, 1987. – 543с.
5. Горяинов В.Т. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. Уч.пособие для вузов / В.Т. Горяинов, А.Г. Журавлев, В.И. Тихонов Под ред.проф. В.И.Тихонова.-2-е изд. –М.: "Сов. радио", 1980. – 544с.
6. Беляев Ю.К. Надежность технических систем :Справочник / Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин и др.Под ред.И.А.Ушакова. –М.: Радио и связь, 1985. –608с.
7. Сучака Е.В. Надежность технических систем / Ред. Е. В. Сучака, Н. В. Василенко. – Красноярск : МПП "Раско", 2001. – 600 с.
8. Волочій Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б.Ю. Волочій – Львів: Вид-во Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. – 220 с.
9. Mandziy B. Analysis of reliability a test model of technical system with constant redundancy and repair unit / Bohdan Mandziy, Maksym Seniv, Bohdan Kuts // Proc. of the VIth Intern. scient. and techn. conf. CSIT-2012, Lviv, November. 21–24, 2012. – Lviv, 2012. – P. 75-77.
10. Мандзій Б.А. Автоматизація побудови моделей надійності резервованих та відновлюваних складних технічних систем / Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський // Східно-Європейський журнал передових технологій №2/4(62), 2013, стор.44-49.

Проведено комп'ютерне моделювання різних методів завадостійкого кодування для системи передачі інформації. Визначено якісні характеристики в умовах впливу адитивного білого гаусового шуму. Зроблені рекомендації щодо використання методів для умов метеороного каналу

Ключові слова: завадостійке кодування модуляції, АБГШ, метеорна система передачі інформації

Проведено компьютерное моделирование различных методов помехоустойчивого кодирования для системы передачи информации. Определены качественные характеристики в условиях влияния аддитивного белого гауссового шума. Сделаны рекомендации по использованию методов для условий метеороного канала

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, АБГШ, метеорная система передачи информации

УДК 621.391

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ МЕТЕОРНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А. В. Воргуль

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: alvorgul@gmail.com

Ю. Х. Сулейман

Аспирант*

*Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Целью работы является анализ наилучших методов помехоустойчивого кодирования, фиксация алгорит-

мов кодирования и декодирования в условиях их применения в цифровой системе передачи информации (ЦСПИ) с точки зрения системы в целом. Проверка качества процедур кодирования и декодирования про-