



ЗАСТОСУВАННЯ ФОРМАЛІЗОВАНОГО ЛОГІКО-ЙМОВІРНІСНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЖИВУЧОСТІ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ МЕРЕЖ

Л. Озірковський^[ORCID: 0000-0003-0012-2908], Б. Волочій^[ORCID: 0000-0001-5230-9921], Н. Приймак^[ORCID: 0009-0000-7816-2497],
Ю. Жук^[ORCID: 0009-0004-4840-2954]

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

Відповідальний за рукопис: Леонід Озірковський (e-mail: leonid.d.ozirkovskiy@lpnu.ua).

(Подано 28 липня 2024)

На прикладі LORA MESH мережі представлено можливості методу логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання для визначення показників живучості систем відповідального призначення з сітковою структурою мережі зв'язку. Запропонований метод формалізовано і на його основі можна реалізувати програмне забезпечення, яке дасть змогу проєктантові отримати кількісні значення показників живучості на етапі системотехнічного проєктування, коли системи ще немає в «залізі» за допомогою моделювання. Аналіз відомих методів розрахунку індексів парної зв'язності показує, що використання певних організованих проміжних структур даних дозволяє підвищити обчислювальну ефективність алгоритмів. У кореляційному методі такими структурами є набори шляхів для i -ї ітерації. У методі декомпозиції відносно ключового елемента з індексованим маскуванням елементів у множині простих шляхів ці структури включають індексований масив елементів мережі, який визначає їх упорядкування за обраним критерієм, вектор рівнів маскування для елементів у набір простих шляхів і стек ймовірностей для неповних шляхів. Тому постає питання про можливість побудови та застосування інших допоміжних структур та дослідження ефективності відповідних алгоритмів. У ході проведених досліджень виникла ідея використовувати «родове дерево» простих шляхів як таку допоміжну структуру, за допомогою якої можна керувати проходженням «імовірнісних пакетів». Методи оцінки живучості з сітковою структурою мереж зв'язку характеризуються високою обчислювальною складністю. Така обчислювальна складність перешкоджає аналізу багатоваріантного аналізу проєктних рішень. Формалізація імовірнісного методу комутації пакетів дозволила знизити обчислювальну складність для користувача (дозволила реалізувати цей метод програмно, оскільки більшість обчислень виконується багаторазово автоматично, крім того, при зміні конфігурації мережі функція для обчислення пар з'єднань формується з меншими витратами часу). Це дозволить проводити багатоваріантний аналіз проєктних рішень, підвищити ефективність проєктування систем та суттєво зменшити часові затрати.

Ключові слова: живучість, система відповідального призначення, індекс зв'язності, ймовірність парної зв'язності, сіткова мережа зв'язку, LoRa Mesh мережа

УДК: 621.391

1. Вступ

Особливістю побудови певних (окремих) різновидів систем відповідального призначення є те, що їх структура є децентралізованою, розподіленою, а елементи структури взаємодіють через мережу зв'язку. Така побудова системи забезпечує її підвищену стійкість до зовнішніх

дестабілізуючих впливів, оскільки для систем відповідального призначення живучість є визначальною властивістю. До таких систем відносяться системи протиповітряної оборони, системи мобільного зв'язку, енергетичні системи, системи управління об'єктами критичної інфраструктури тощо.

Під живучістю системи розуміється її властивість залишатися працездатною в умовах негативних зовнішніх впливів [1]. Живучість системи вважають високою, якщо для суттєвого погіршення функціонування або повної втрати працездатності треба зруйнувати значну кількість елементів мережі зв'язку, що входить в її склад. Для різних галузей поняття «живучості» конкретизується відповідними нормативними документами [2].

Об'єктом дослідження в даній роботі є система відповідального призначення, в якій в якості мережі зв'язку застосовано LORA MESH мережу [3],[4]. Топологія досліджуваної мережі зв'язку представлена на рис. 1. Система складається з сукупності кінцевих пристроїв, вузлів інтернету та шлюзів, які забезпечують доступ до інтернету. Передавання повідомлень від кожного вузла програми здійснюється одночасно багатьма шляхами. Для цього треба сформувати таку сіткову структуру для мережі зв'язку, яка буде забезпечувати ймовірність доставляння повідомлень не нижче заданого (обгрунтованого) значення без перевищення регламентованого часу. Оскільки структура мережі зв'язку є сітковою, то від кожного вузла є декілька шляхів доставлення повідомлень. В нашому випадку живучість визначається кількістю можливих зв'язків між елементами розподіленої структури системи відповідального призначення. Якщо тривалість доставляння повідомлень перевищує регламентований час, то таке повідомлення є неактуальним.

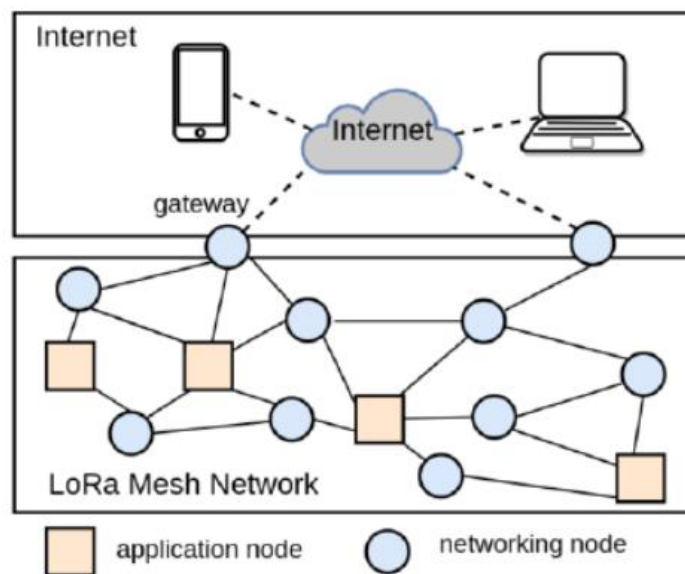


Рис. 1. LoRa mesh мережа та інтеграція з інтернетом через шлюзи

Для кількісного оцінювання і порівняння можливих варіантів сіткової структури для мережі зв'язку застосовують наступні показники структурної живучості [5, 6]: ймовірність парної зв'язності, ймовірність зв'язності вузла з мережею та середнє значення ймовірності зв'язності для мережі. Ці показники характеризують потенційні можливості сіткової структури мережі зв'язку і дають змогу виявити її вузькі місця.

Для практичного визначення кількісних значень показників структурної живучості для багатозв'язних мереж зв'язку, які містять десятки вузлів та сотні ребер потрібне застосування методів, які дозволяють проводити аналіз багатьох варіантів реалізації системи за короткий час. Основною вимогою до методів визначення показників структурної живучості є можливість їх формалізації з подальшою реалізацією у вигляді програмного забезпечення при високій точності отриманих результатів та невисоких часових затратах на побудову моделі.

2. Аналіз існуючих рішень для розрахунку показників живучості.

На сьогодні відома значна кількість методів розрахунку показників живучості. Ці методи можна розділити на дві великі групи: аналітичні та чисельні. Перша група методів дає змогу отримати показники живучості з високою точністю, однак потребує великих затрат часу, великого об'єму обчислювальних ресурсів та високої кваліфікації проєктанта в галузі математичного моделювання та суміжних областях. Чисельні методи не завжди є точними, потребують суттєвих обчислювальних затрат, але краще піддаються формалізації.

Існуючі методи суттєво відрізняються за рівнем формалізованості і затратами обчислювальних ресурсів. Деякі з відомих методів придатні тільки для розрахунку зв'язності певних, як правило, регулярних конфігурацій.

Для складних кластеризованих мереж зв'язку, на сьогодні популярним є Clustering coefficient method [7]. Цей метод кількісно вимірює ступінь, до якого вузли в мережі мають тенденцію об'єднуватися в кластери. Для пари вузлів коефіцієнт кластеризації вимірює частку їхніх спільних сусідів відносно всіх можливих зв'язків між ними. Вище значення коефіцієнта кластеризації вказує на вищу зв'язність між вузлами. Відносний коефіцієнт кластеризації характеризує властивість живучості мережі [8]. Метод придатний для великих мереж, однак не дає змоги отримати ймовірність парної зв'язності.

Degree of connectivity method [9] визначає прямі зв'язки кожної вершини, які зазвичай вимірюються величиною – ступенем вершини, тобто кількістю ребер, що інцидентні вершині. Для пари вершин їх зв'язність можна оцінити, порівнюючи їх індивідуальні ступені та досліджуючи, скільки спільних сусідів вони мають. Метод придатний для невеликих мереж, які мають сумарно декілька десятків вузлів та ребер.

Для систем відповідального призначення вибір методу залежить також від специфічних характеристик мережі зв'язку та аспекту зв'язності, що аналізується. В практиці проєктування застосовуються методи оцінювання парної зв'язності для специфічних мереж, а саме метод декомпозиції kShell краще працює для повнозв'язних топологій глобальних мереж, а метод ступенів сусідів – для неповнозв'язних топологій глобальних мереж [10]. Деякі методи зосереджуються на фізичному існуванні шляху (найкоротший шлях, геодезична відстань, існування ребер), тоді як інші розглядають якість зв'язку (індекс Каца, коефіцієнт кластеризації [7], мережева кореляційна функція).

Потужним ітераційним методом є Greedy randomized adaptive search procedure – GRASP [11]. Цей метод дає змогу побудувати високонадійну мережу, припускаючи, що ймовірності відмови всіх ліній і вузлів відомі, а кількість шляхів вибирається мінімальною, щоб забезпечити задану величину ймовірності парної зв'язності. Обмеженням даного методу є мережа до 200 вузлів.

Одним з найкращих на сьогодні вважають кореляційний метод [12], з яким успішно конкурує вдосконалений метод розкладу відносно ключового елемента з використанням динамічного індексування елементів множини простих шляхів та елементів мережі. Однак ефективність цих методів значно нижча за ефективність методу, який розглядається в даній роботі. Під час дослідження функціональної живучості інформаційних систем можуть використовуватися теоретично-ігрові, імовірнісні, графові та матричні моделі.

Для аналізу оцінки живучості розподілених багатозв'язних мереж зв'язку систем відповідального призначення, доцільно використати логіко-імовірнісні моделі, відповідно до яких елементи системи та сама система мають двозначну логіку функціонування (система справна або несправна) і всі події в системі незалежні.

Методи розрахунку ймовірностей зв'язності інформаційних мереж [5] базуються на співвідношеннях, отриманих в теорії графів, декомпозиції складних систем на підсистеми, логіко-імовірнісних перетвореннях функції працездатності. Відомим алгоритмам, які реалізують названі методи, властива висока обчислювальна складність для мереж зв'язку навіть середнього рівня складності. Це зумовлює актуальність пошуку нових методів і алгоритмів розрахунку показників структурної живучості, обчислювальна складність яких дозволяла би реалізувати інтерактивний режим проєктування.

3. Суть методу логіко-ймовірнісного траекторного моделювання та його формалізація

В основу методу оцінювання живучості покладено LoRa MESH мережу у вигляді ймовірнісного графа сіткової структури мережі зв'язку і логіко-ймовірнісний підхід компонування виразів для визначення показників зв'язності між вузлами графа. Зауважимо, що параметрами ймовірнісного графа структури є ймовірності існування гілок і вузлів. При цьому значення ймовірностей існування вузлів дорівнює 1, а значення ймовірностей існування гілок є меншими за одиницю. Для практичного використання такого ймовірнісного графа сіткової структури мережі зв'язку в методиці визначення значення показника живучості LoRa MESH мережі необхідно дати технічну інтерпретацію для його параметрів. Показники зв'язності сіткової структури «показують» верхню межу для значень показника живучості «ймовірність доставляння повідомлень не нижче заданого (обгрунтованого) значення без перевищення регламентованого часу». Зауважимо, що для визначення верхньої межі вся сіткова структура від кожного акустичного поста до центру управління вважається середовищем для передавання повідомлень. І мають бути задані (або визначені) значення ймовірностей існування всіх гілок ймовірнісного графа.

Для отримання кількісних значень показників живучості систем відповідального призначення пропонується взяти за основу метод комутації ймовірнісних пакетів [13], формалізувати його та створити на його основі метод логіко-ймовірнісного траекторного моделювання багатозв'язних мереж.

В основі методу комутації ймовірнісних пакетів лежить відома теорема математичної логіки про розклад функції логіки по будь-якому аргументу [5]. Суть методу комутації ймовірнісних пакетів для розрахунку парної зв'язності полягає в наступному. В початковому вузлі заданої пари формується інформаційний пакет. Кожний, не абсолютно надійний, елемент мережі (лінія чи вузол), крім кінцевого вузла, розмножують отримані для транспортування пакети на 2. Кожний пакет передається наступному елементу згідно з структурою та логікою функціонування. Якщо наступний елемент непрацездатний, то відбувається пошук іншого шляху транспортування до заданого кінцевого вузла. Якщо такого шляху не існує, то пакет втрачається. Процес транспортування пакетів продовжується до досягнення кінцевого вузла. Коли пакет досягає кінцевого вузла, він поглинається. Ймовірність парної зв'язності визначається, як сума ймовірностей існування всіх пакетів, які досягли кінцевого вузла.

Формалізація методу комутації ймовірнісних пакетів полягає в перетворенні топології мережі зв'язку в родове дерево. Родове дерево отримують на основі множини простих маршрутів, які представляються послідовністю вузлів. Отримані множини маршрутів сортуються за певними правилами. В результаті сортування отримується родове дерево. На основі родового дерева визначаються множини гілок дерева, які дають змогу обчислити ймовірність існування кожного шляху. Далі проводиться комутація ймовірнісних пакетів і відповідно до алгоритму, описаному нижче розраховується ймовірність парної зв'язності між двома вибраними вузлами.

4. Аналіз показників зв'язності LORA MESH мереж методом логіко-ймовірнісного траекторного моделювання

Робота формалізованого методу логіко-ймовірнісного траекторного моделювання проілюстрована на прикладі аналізу живучості акустичної системи виявлення БпЛА. Акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів складається з 7-ми акустичних постів, які пов'язані між собою бездротовою мережею з технологією LoRa. Топологія мережі зв'язку представлена на рис. 2. На основі заданої топології відомих початкового і кінцевого вузлів будується множина простих маршрутів. Початковим є 1-ий вузол, кінцевий – 7. Кожен маршрут представляється послідовністю вузлів.

Множину простих маршрутів в структурі приведено в таблиці 1. Кожен маршрут представляється послідовністю вузлів.

Далі маршрути сортуються за правилом модифікацій „родового дерева”. Маршрути з однаковим другим вузлом групуються і створюють свої підмножини. Після сортування по другому

вузлу множина маршрутів розбивається на підмножини з однаковим другим вузлом. Впорядкована таким чином множина маршрутів представлена в таблиці 2.

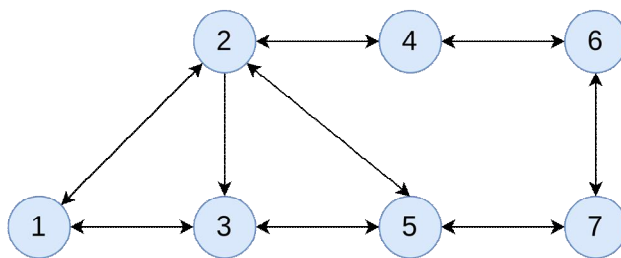


Рис. 2. Модель структури інформаційної мережі

Таблиця 1

Не впорядковані маршрути

Позначення маршруту	Траса маршруту
m1	1->3->5->7
m2	1->2->3->5->7
m3	1->3->2->5->7
m4	1->2->4->6->7
m5	1->2->5->7
m6	1->3->2->4->6->7
m7	1->3->5->2->4->6->7

Таблиця 2

Маршрути з однаковим 2 вузлом

Позначення маршруту	Траса маршруту
m1	1->2->3->5->7
m2	1->2->4->6->7
m3	1->2->5->7
m4	1->3->2->4->6->7
m5	1->3->5->2->4->6->7
m6	1->3->2->5->7
m7	1->3->5->7

Посортована множина шляхів приведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Посортовані маршрути

Позначення маршруту	Траса маршруту
m1	1->2->3->5->7
m2	1->2->4->6->7
m3	1->2->5->7
m4	1->3->2->4->6->7
m5	1->3->2->5->7
m6	1->3->5->2->4->6->7
m7	1->3->5->7

На рис. 3 великими кружечками позначені – вузли, а малими – лінії зв’язку.

На основі цієї множини маршрутів будувється допоміжна структура “родове дерево”, яке зображене на рис. 4. Великі кружечки, це нумерація вузлів. Маленькі кружечки – це номер гілки родового дерева.

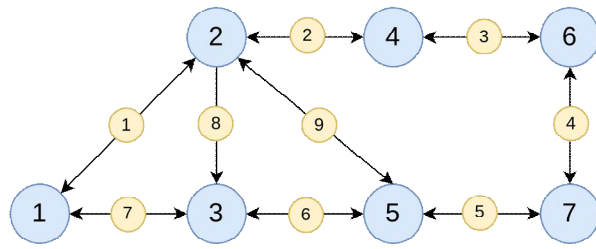


Рис. 3. Елементи структури

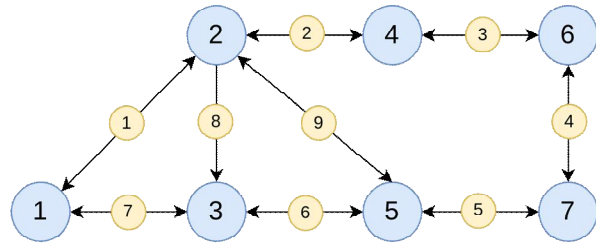


Рис. 4. Родове дерево

На основі родового дерева створено таблицю з гілками “родового дерева” (таблиця 4) базуючись на “родовому дереві” та елементах структури.

Таблиця 4

Значення інформаційної частини “родового дерева”

Номер гілки родового дерева	Наступна гілка	Альтернативна гілка	Номер елемента структури
1	3	2	1
2	6	-1	7
3	8	4	8
...
22	-1	-1	4

Ймовірності існування гілок відповідно $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9$. Для зручності обрахунку, приймемо, що всі ймовірності існування гілок (ймовірність того, що гілка знаходиться в працездатному стані) дорівнюють 0.9. Вузли вважаються абсолютно надійними.

Далі проводиться комутація ймовірнісних пакетів. Схематично на рис.5 синім кольором позначено вузли мережі, зеленим кольором шлях першого пакету і червоним кольором пакети, які розмножуються внаслідок непрацездатного стану ліній зв'язку. В середині зелених і червоних кружечків, вказано ймовірність існування таких пакетів.

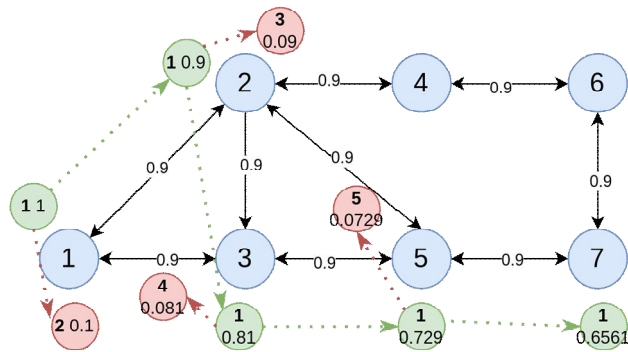


Рис. 5. Проходження пакетів

Для виконання розрахунку задаються початковий (1) і кінцевий (7) вузли структури, очищуються лічильники сумарних ймовірності зв'язності і ймовірності втрат. В початковий вузол структури (1) заноситься ймовірнісний пакет. Ймовірнісний пакет посилається на першу гілку (між вузлами 1 та 2). Ймовірнісний пакет розмножується на два. Один пакет з ймовірністю p_1 (p_1 – ймовірність працездатного стану першого елемента структури) переходить на наступну гілку, номер якої записаний в показнику “наступна гілка”, згідно таблиці IV (це є гілка під номером 3). В інформаційній частині пакету фіксується пройдений елемент структури і його працездатний стан. Ймовірнісна частина пакету множить на ймовірність працездатного стану першого елемента структури і стає рівною $0.9 (1 * 0.9)$. В інформаційній частині другого пакету фіксується елемент і його непрацездатний стан ($1 * (1 - 0.9) = 0.1$). Другий пакет переходить на гілку, номер якої записаний в “альтернативна гілка”, згідно таблиці IV (це є гілка під номером 2). В стек додається пакет під номером 2. Після цього пакет 1 проходить гілку 3, ймовірнісна частина пакету множить на ймовірність працездатного стану елемента структури і стає рівною $0.81 (0.9 * 0.9 = 0.81)$. Ймовірнісний пакет розмножується на два, і утворюється пакет 3, ймовірнісна частина пакету множить на ймовірність непрацездатного стану елемента структури і стає рівною $0.09 (0.9 * 0.1 = 0.09)$. Аналогічно, перший пакет проходить інші гілки і досягає кінцевого вузла 7. До сумарної зв'язності додається ймовірність існування пакету, а сам ймовірнісний пакет знищується. Після цього інші пакети проходять гілки, і намагаються досягти 7 вузла. Якщо пакет немає альтернативних гілок, то він знищується, а ймовірність цього пакету додається до сумарних втрат.

Після проходження усіх пакетів, лічильник покаже сумарну ймовірність зв'язності між 1 та 7 вузлом.

Висновки

В даній роботі представлено визначення показника структурної живучості (ймовірності парної зв'язності) LoRa MESH мережі. Визначення ймовірності парної зв'язності здійснено формалізованим методом логіко-ймовірнісного траекторного моделювання. Даний метод є подальшим розвитком методу комутації ймовірнісних пакетів, розробленого авторами. Удосконалений метод показав невисоку обчислювальну складність. Вперше було формалізовано метод, що надасть можливість подальшої автоматизації. Подальше вдосконалення даного методу дасть змогу аналізувати показники структурної живучості мереж зв'язку з ієрархічною структурою, що суттєво розширить функціональність методу. На основі формалізованого методу логіко-ймовірнісного траекторного моделювання планується розробити програмне забезпечення для визначення показників структурної живучості систем відповідального призначення з мережею зв'язку довільної конфігурації.

Список використаних літературних джерел

- [1] Бачинський, І. В. Термінологічний словник з інформаційної безпеки [Текст] / І. В. Бачинський, В. Б. Дудикевич, В. С. Зачепило, Л. Т. Пархуць, В. В. Хома, О. В. Яструбецький. – Львів, 2005. – 140 с. – ISBN 966-8041-34-8.
- [2] ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення
- [3] Freitag, F. & Miquel Solé, Joan & Meseguer, Roc. (2023). Position Paper: LoRa Mesh Networks for Enabling Distributed Intelligence on Tiny IoT Nodes, doi:10.3233/AISE230026.
- [4] Mohamed Saban, Otman Aghzout, Leandro D. Medus, Alfredo Rosado, Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN under Indoor and Outdoor Environments: Performance and Limitations, IFAC-PapersOnLine, Volume 54, Issue 4, 2021, Pages 159-164, doi:10.1016/j.ifacol.2021.10.027.
- [5] Beichelt F., Franken P., Zuverlässigkeit & Instandhaltung-Math. Methoden, 1983, Technik, Berlin – 392 p.
- [6] Frank Beichelt, Peter Tittmann Reliability and Maintenance. Networks and Systems, Chapman and Hall/CRC, 2012. – 344p, doi: 10.1201/b12095.
- [7] Aguilar-Alarcón, Jhon & Hernández-Gómez, Juan & Romero-Valencia, Jesús. The Clustering Coefficient for Graph Products. Axioms. 2023, doi: 10.3390/axioms12100968

- [8] Touli, Elena & Lindberg, Oscar. (2022). *Relative Clustering Coefficient*. *JAC: A Journal of Composition Theory*, doi: 10.22059/JAC.2022.88373.
- [9] Metz, Fernando & Peron, Thomas. *Mean-field theory of vector spin models on networks with arbitrary degree distributions*, 2022, doi: 10.1088/2632-072X/ac4bed.
- [10] Namtirtha, Amrita & Dutta, Animesh & Dutta, Biswanath. (2019). *Weighted kshell degree neighborhood: A new method for identifying the influential spreaders from a variety of complex network connectivity structures*. *Expert Systems with Applications*, doi: 139. 112859. 10.1016/j.eswa.2019.112859.
- [11] *Reliability and Maintenance – an Overview of Cases Edited by Leo Kounis*, IntechOpen, 2020. – 191p., doi: 10.5772/intechopen.77493.
- [12] Dudnik, B., *Reliability and survivability of communication systems*, *Radio and Communication*, 1984. – 215 p.
- [13] Belyaev, V., Volochii, B., Ozirkovskyy, L., Pavliv, M., *Evaluation of the effectiveness of methods for calculating the indicators of connectivity in the structural analysis of radioelectronic complex systems; Theoretical Electrical Engineering*; Svit Publishing House, Issue 54, 1998, p. 87-93

APPLYING A FORMALIZED LOGICAL-PROBABILISTIC METHOD FOR DETERMINING THE SURVIVABILITY INDICATORS OF MESH NETWORKS

L. Ozirkovskyy, B. Volochiy, N. Pryymak, Yu. Zhuk

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

Using the example of an LORA MESH network, the capabilities of the logic-probabilistic trajectory modeling method for determining the survivability indicators of mission-critical systems with a mesh network structure are presented. The proposed method is formalized, and based on it, software can be implemented that allows the designer to obtain quantitative values of survivability indicators at the system engineering design stage, when the system has not yet been built in hardware, through modeling. The analysis of known methods for calculating pairwise connectivity indices shows that the use of certain organized intermediate data structures can enhance the computational efficiency of algorithms. In the correlation method, such structures are the sets of paths for the i -th iteration. In the decomposition method, relative to the key element with indexed masking of elements in the set of simple paths, these structures include an indexed array of network elements, which determines their ordering by the chosen criterion, a vector of masking levels for elements in the set of simple paths, and a stack of probabilities for incomplete paths. Therefore, the question arises about the possibility of constructing and applying other auxiliary structures and investigating the efficiency of corresponding algorithms. During the conducted research, the idea emerged to use a "spanning tree" of simple paths as such an auxiliary structure, by means of which it is possible to manage the passage of "probability packets". Methods for evaluating survivability with a grid structure of communication networks are characterized by high computational complexity. Such computational complexity hinders the multivariate analysis of design decisions. The formalization of the probabilistic packet switching method has allowed reducing computational complexity for the user (enabled the implementation of this method in software, as most calculations are performed repeatedly automatically; moreover, when changing the network configuration, the function for calculating connection pairs is formed with less time expenditure). This will allow for multivariate analysis of design decisions, improve the efficiency of system design, and significantly reduce time costs.

Keywords: *safety-critical systems, connectivity index, probability of pairwise connectivity, grid communication network, LoRa Mesh networks*