

УДК 621.395

А. Б. Феценко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)
О. В. Загора, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-9042-6838)
Л. В. Борисова, к.ю.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6554-1949)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

РОЗРОБКА ІМОВІРНІСНОЇ МОДЕЛІ ТИПОВОГО ФРАГМЕНТА ВІДОМЧОЇ ЦИФРОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ДСНС

Проведений аналіз призначення, умов роботи складових елементів, ієрархічності структури відомчої цифрової телекомунікаційної мережі Державної служби з надзвичайних ситуацій України, яка розглядається як сукупність типових мережевих фрагментів. Представлена структура типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка складається з центрального, регіонального і районного вузлів, послідовно з'єднаних каналами зв'язку. Обґрунтовані потрібні значення ймовірності безвідмовної роботи вузлів і каналів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі в залежності від потрібного значення структурної надійності типового фрагменту. Запропоновано застосування структурного роздільного двократного резервування вузлів з різними ступенями ієрархії для типових фрагментів з метою одночасного зниження вимог до надійності вузлів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. Розроблена імовірнісна модель типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі у вигляді блок-схем надійності для структур з багатократним резервуванням центральних, регіональних районних вузлів і каналів зв'язку. Отримані аналітичні вирази для дослідження впливу структури типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі на його надійність шляхом статистичного математичного моделювання. Приводяться аналітичні й графічні матеріали статистичного математичного моделювання по дослідженню залежності ймовірності справного стану типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі від структури типового фрагменту з резервуванням і надійності відповідних мережевих вузлів і каналів зв'язку. Рекомендована доцільність з метою підвищення ймовірності справного стану типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі на етапі проектування обирати структури з двократним резервуванням вузлів як мінімум на центральному рівні, як максимум на всіх рівнях, та розраховуючи на проміжні значення надійності при резервуванні вузлів центрального та регіонального рівня.

Ключові слова: цифрова телекомунікаційна мережа, надійність, ймовірність безвідмовної роботи, надзвичайна ситуація

1. Вступ

Підвищення оперативності та якості прийняття рішень при організації ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, аварій, катастроф, стихійного лиха, гасіння пожеж, рятування людей у підрозділах ДСНС України обумовлює використання новітніх комп'ютерних технологій, відомчої цифрової телекомунікаційної мережі (ВЦТМ) ДСНС, як функціональної підсистеми Єдиної інформаційної системи МВС України при оперативно-диспетчерському управління силами та засобами ДСНС України під час реагування та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС).

Надійність роботи вузлів та каналів зв'язку ВЦТМ ДСНС визначається ймовірністю безвідмовної роботи та коефіцієнтом готовності, які залежить від інтенсивності відмов та обраної структури типових фрагментів ВЦТМ.

В режимі пікового навантаження під впливом електричних перевантажень зростає інтенсивність відмов, що може приводити до тривалих затримок в роботі вузлів та каналів зв'язку у складі типових фрагментів ВЦТМ ДСНС.

Тому, актуальною проблемою є недопущення аварійних станів вузлів та каналів зв'язку відомчої цифрової телекомунікаційної мережі під час експлуатації в умовах надзвичайної ситуації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [1] Застосовані формальні методи аналізу безвідмовної роботи телекомунікаційної мережі. Розглядається класифікація відмов і перелік телекомунікаційної апаратури, підданої відмовам в умовах перенавантаження.

Умови перенавантаження приводять до втрати працездатності каналів обміну інформацією, для підтримки працездатності телекомунікаційної мережі пропонувався спосіб резервування каналів та вузлів. У якості моделі телекомунікаційної мережі для таких випадків був обраний імовірнісний граф із абсолютно надійними ребрами, де надійність кожної вершини характеризувалася функцією розподілу, однак при цьому не враховувались вплив структури резервування вузлів та каналів зв'язку на надійність типового фрагменту телекомунікаційної мережі та на аналізувались вимоги до надійності типових фрагментів телекомунікаційної мережі під час експлуатації в умовах перенавантаження.

У [2] показано, що при впливі зовнішніх факторів експлуатації в телекомунікаційній мережі помітно змінюється характер трафіка, що обслуговується, і виникають відмови основних елементів, таких як вузли комутації й канали обміну інформацією, причому кількість елементів, що відмовили, варіюється в широких межах. Відзначено, що телекомунікаційній мережі властиві також внутрішні або структурні потенційні погрози зниження надійності й живучості при співіснуванні фрагментів мережі, побудованих на різних технологіях комутації й передачі інформації (канальної й пакетної). Для умов пікового навантаження із виходом з ладу, як вузлів комутації, так і каналів обміну інформацією запропонована модель гіпотетичної телекомунікаційної мережі у вигляді імовірнісного графа, у якому всі елементи описуються функціями розподілу й мають кінцеві значення коефіцієнтів готовності, оціночні чисельні розрахунки показників надійності вузлів та каналів зв'язку типових фрагментів телекомунікаційної мережі не проводились, а конкретні функції розподілу не застосовувались.

У [3] визначені основні характеристики й показники якості функціонування, а також комбінований підхід до структурного й динамічного моделювання для аналізу надійності в інтелектуальних мережах. Запропонований показник якості у вигляді комплексного коефіцієнта працездатності, рівний добутку коефіцієнти готовності, живучості й перешкодозахищеності. Також вказано, що для підвищення рівня постійної готовності інтелектуальних мереж до практичного застосування потрібне наукове обґрунтування організація технічної експлуатації при скороченні витрат на проведення технічного обслуговування за рахунок забезпечення достатності в інтелектуальних мережах. Однак, імовірнісні моделі прогнозування імовірності безвідмовної роботи типового фрагменту інтелектуальної мережі в залежності від її структури не застосовувались, та оціночні чисельні розрахунки не проводились.

У [4] Застосований аналіз надійності мереж випадкового обміну з використанням блок-схем надійності з урахуванням зв'язку ребер напрямків передачі даних між центром і пунктами прийому як показник структурної надійності мережі, розроблена методика знаходження ймовірності зв'язку складних мережевих структур, описуваних випадковим графом двополусної мережі, однак вивчення впливу структури і її оптимізація для підвищення надійності типових фрагментів телекомунікаційної мережі не розглядалось.

У [5] проведена оцінка працездатності центру екстреного виклику на основі з використанням неоднорідні й ієрархічні стратегії моделювання (RBD і SPN) за

критерієм доступності й мінімізації часу простою пропущених дійсних викликів було проаналізовано у зв'язку з відмовами телекомунікаційних мереж. Для зменшення часу простою запропоновано модернізувати архітектуру телекомунікаційних мереж. При цьому оцінні розрахунки надійності елементарних фрагментів телекомунікаційних мереж і аналіз необхідності введення резервування в архітектуру типових фрагментів мережі не проводилися.

У [6] наведений огляд методів моделювання й аналізу надійності мереж зв'язку, таких як діаграми блоку надійності, дерева розламу, ланцюги Маркова. Представлені рекомендації для застосування математичних, аналітичних і формальних методів аналізу мереж зв'язку, конкретних результатів моделювання надійності типових фрагментів мереж зв'язку не доведено.

У [7] представлені теорія відновлення працездатності ВЦТМ з порушеннями потоку, викликаними збоями компонентів у потокових ВЦТМ, найшвидші алгоритми оптимізації потоку в ВЦТМ після збоїв або перевантажень із можливістю за рахунок високої обчислювальної швидкості оптимального управління дуже більшими й складними мережами в режимі реального часу можливістю повторної оптимізації потоків ВЦТМ, що зводить до мінімуму перебоїв в потоці, викликаних збоями. Між тим розробка, аналіз структури імовірнісної моделі типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі не проводилися.

У [8] розглядаються методи моделювання й аналізу надійності програмного забезпечення ВЦТМ, які використовують UML у якості мови для візуалізації, специфікації, конструювання й документування артефактів програмних систем. Аналіз, моделювання і специфікація надійності програмного забезпечення ВЦТМ здійснюються у профілі DAM.

У [9] розроблена методика графоаналітичної оцінки надійності і продуктивності в автоматизованій відмовостійкій системі на основі аналізу графу та статистичних даних з експлуатації елементарних фрагментів стохастичної мережі. Можливості даної методики не передбачують прогнозування імовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ СОДУ під час реагування і ліквідації наслідків НС.

У [10] розроблена імовірнісна модель прогнозування структурної ймовірності безвідмовної роботи елементарного фрагмента ВЦТМ СОДУ залежно від показників безвідмовності та ремонтпридатності, яка складається з двох вузлів і каналу зв'язку між ними. Аналіз впливу структури типових фрагментів ВЦТМ з урахуванням використання резервування вузлів та каналів зв'язку на їх надійність в даній роботі не проводився.

У зв'язку із цим, невирішеною частиною проблеми є відсутність імовірнісної моделі впливу структури резервування типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі на його надійність.

3. Мета та завдання дослідження

Мета даної роботи полягає в розробленні імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі враховуючий вплив структури резервування на його надійність для проектування, впровадження, та експлуатації відомчої цифрової телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайної ситуації.

Для досягнення мети роботи потрібно і вирішити наступні завдання дослідження:

– розробити імовірнісну модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням;

– дослідити вплив структури резервування фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі на надійність.

4. Розробка імовірнісної моделі типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням

Розглянемо функціональний склад ВЦТМ ДСНС з метою обрання моделі графоаналітичної структури її типового фрагменту.

ВЦТМ ДСНС має ієрархічну структуру та складається з центральних вузлів ВЦТМ ДСНС (основний, резервний), окремих вузлів 1-го рівня (регіональний рівень) а також окремих вузлів 2-го рівня (районний рівень).

Передача даних ВЦТМ ДСНС забезпечується каналами зв'язку ДСНС, каналами зв'язку операторів телекомунікацій та державними каналами зв'язку спеціального призначення.

Тоді виберемо наступну графоаналітичну структуру типового фрагменту ВЦТМ який забезпечує передачу даних від центрального вузла ВЦТМ ДСНС (основний, резервний) через окремих вузлів 1-го рівня (регіонального рівня) до відповідного окремого вузла 2-го рівня (районного рівня) без урахування резервування вузлів та каналів зв'язку, що наведено на Рис. 1.

На Рис. 1 буквами позначені вузли графу c , a , b та канали передачі даних k_{ca} , k_{ab} фрагменту ВЦТМ, які пронумеровані цифрами 1, 2, 3, 4, 5. Кожному елементу графа на Рис. 1 вповідають певні ймовірності безвідмовної роботи $p_c(t)$ - центрального вузла, $p_a(t)$ - вузла 1-го рівня (регіонального рівня), $p_b(t)$ - вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів зв'язку $P_{c,a}(t)$ і $P_{a,b}(t)$.

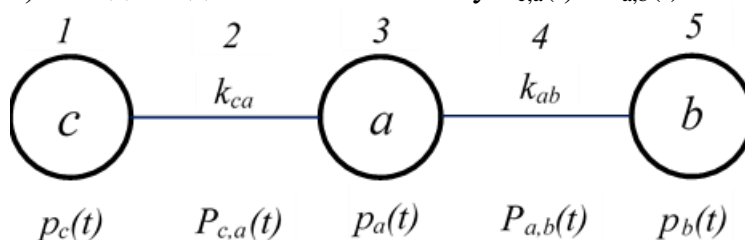


Рис. 1. Структурна схема надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування

Прогнозування надійності ВЦТМ умовно поділимо на три етапи: обрання структурної схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування, обґрунтування потрібної надійності елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ, розробки імовірнісної моделі й розрахунок структурної надійності типового фрагменту ВЦТМ. При цьому обґрунтування елементної надійності є вхідними даними для моделювання структурної надійності типового фрагменту ВЦТМ.

У процесі функціонування ВЦТМ відбувається обмін інформацією між відправником s і одержувачем a інформації (таких інформаційних напрямків може бути кілька, при розрахунках надійності системи як основного заходу використовують так звані ймовірність $P_{c,a,b}$ зв'язку триполюсної мережі. Триполюсна мережа - математична модель інформаційного напрямку, виділюваного в системі з трьох вузлів.

Під $P_{c,a,b}$ розуміють ймовірність події $E_{c,a,b}$ застати в довільний момент часу між c , a , і b у справному стані хоча б один шлях передачі інформації. При визначенні математичних описів для розрахунків показників надійності елемента ВЦТМ прийняті наступні допущення:

– відмови окремих елементів ВЦТМ є випадковими незалежними подіями - дисперсними випадковими величинами з законом розподілу Пуассону:

- наробіток на відмову й час відновлення технічних засобів і трактів обміну інформацією ВЦТМ - безперервні випадкові величини;
- відмови елементів ВЦТМ не залежать друг від друга, тобто є випадковими незалежними подіями;
- програмно-алгоритмічний комплекс (ПАК) ВЦТМ повністю налагоджене й не містить помилок, що приводять до відмов.

У якості показника надійності елемента (вузла або каналу зв'язку) ВЦТМ використаємо імовірності відповідно справного p_i і несправного q_i станів i -го елемента ВЦТМ за певну наробітку, для яких також справедливо $p_i + q_i = 1$

Виходячи зі структури типового фрагменту ВЦТМ Рис. 1, при обліку надійності вершин c , a і b проведемо обчислення структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ $P_{c,a,b}^{\oplus}$ триполюсної мережі за формулою:

$$P_{c,a,b}^{\oplus} = p_c \cdot P_{c,a} \cdot p_a \cdot P_{a,b} \cdot p_b, \quad (1)$$

де p_c , p_a і p_b – імовірності справного стану (коефіцієнти готовності) вузлів ВЦТМ c , a , і b ; $P_{c,a}$, $P_{a,b}$ – ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку типового фрагменту ВЦТМ.

Для обґрунтування потрібної надійності елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ приймемо усі елементи типового фрагменту ВЦТМ рівнонадійними $p_c = P_{c,a} = p_a = P_{a,b} = p_b = p$ тоді згідно з (2) $P_{c,a,b}^{\oplus} = p^5$.

Значення структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ відповідає умові $P_{c,a}^{\oplus} \geq 0,995$, це означає, що ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента типового фрагменту ВЦТМ повинні досягати величини $p = \sqrt[5]{P_{c,a}^{\oplus}} = \sqrt[5]{0,995} = 0,999$. Це дуже жорсткі вимоги до надійності елементів типового фрагменту ВЦТМ Рис.1. Для забезпечення потрібної надійності типового фрагменту ВЦТМ і одночасному зменшенні вимог до надійності елементів, як показано ще і в попередній роботі авторів [10] доцільно застосовувати роздільне резервування з кратністю резервування $m_{\text{роз}} = 2$. Тоді оцінимо надійність елемента p , наприклад, при $m_{\text{роз}} = 2$ з формули (2) для системи з роздільним резервуванням елементів ВЦТМ.

$$m_{\text{роз}} = \frac{\lg\left(1 - (P_{\text{роз}})^{1/N}\right)}{\lg(1 - p)}. \quad (2)$$

Перетворимо (2) відносно p до розрахункового вигляду

$$p = 1 - 10^{-\frac{\lg\left(1 - (P_{\text{роз}})^{1/N}\right)}{m_{\text{роз}}}}. \quad (3)$$

При проведенні оціночного розрахунку за формулою (4) при $P_{\text{роз}}=0,995$, $N=5$ $m_{\text{роз}} = 2$ потрібна надійність окремого елемента ВЦТМ дорівнює $p=0,9684$.

Для дослідження структурної надійності типового фрагменту ВЦТМ побудуємо блок-схеми надійності для різноманітних конфігурацій з резервуванням вузлів ВЦТМ рис. 2.

Напишемо вираження для імовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ згідно з відповідним варіантом конфігурації резервування вузлів, вказаних на блок-схемах надійності рис. 2.

$$\begin{aligned} P_{c,a,b,1}^{\oplus} &= [1 - (1 - p_{co}) \cdot (1 - p_{cp})] \cdot P_{c,a} \cdot P_{ao} \cdot P_{a,b} \cdot P_{bo} \\ P_{c,a,b,2}^{\oplus} &= [1 - (1 - p_{co}) \cdot (1 - p_{cp})] \cdot P_{c,a} \cdot [1 - (1 - p_{ao}) \cdot (1 - p_{ap})] \cdot P_{a,b} \cdot P_{bo} \\ P_{c,a,b,3}^{\oplus} &= [1 - (1 - p_{co}) \cdot (1 - p_{cp})] \cdot P_{c,a} \cdot [1 - (1 - p_{ao}) \cdot (1 - p_{ap})] \cdot P_{a,b} \cdot [1 - (1 - p_{bo}) \cdot (1 - p_{bp})] \end{aligned} \quad (4)$$

Для оціночних розрахунків припустимо, що усі вузли типового фрагменту ВЦТМ рівнонадійні $p_{co} = p_{cp} = p_{ao} = p_{ap} = p_{bo} = p_{bp} = c = p$, тоді вираження (4) перетворюються до наступного виду

$$\begin{aligned} P_{c,b,1}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2] \cdot p^2 \cdot P_{c,a} \cdot P_{a,b} \\ P_{c,b,2}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2]^2 \cdot p \cdot P_{c,a} \cdot P_{a,b} \\ P_{c,b,3}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2]^3 \cdot P_{c,a} \cdot P_{a,b} \end{aligned} \quad (5)$$

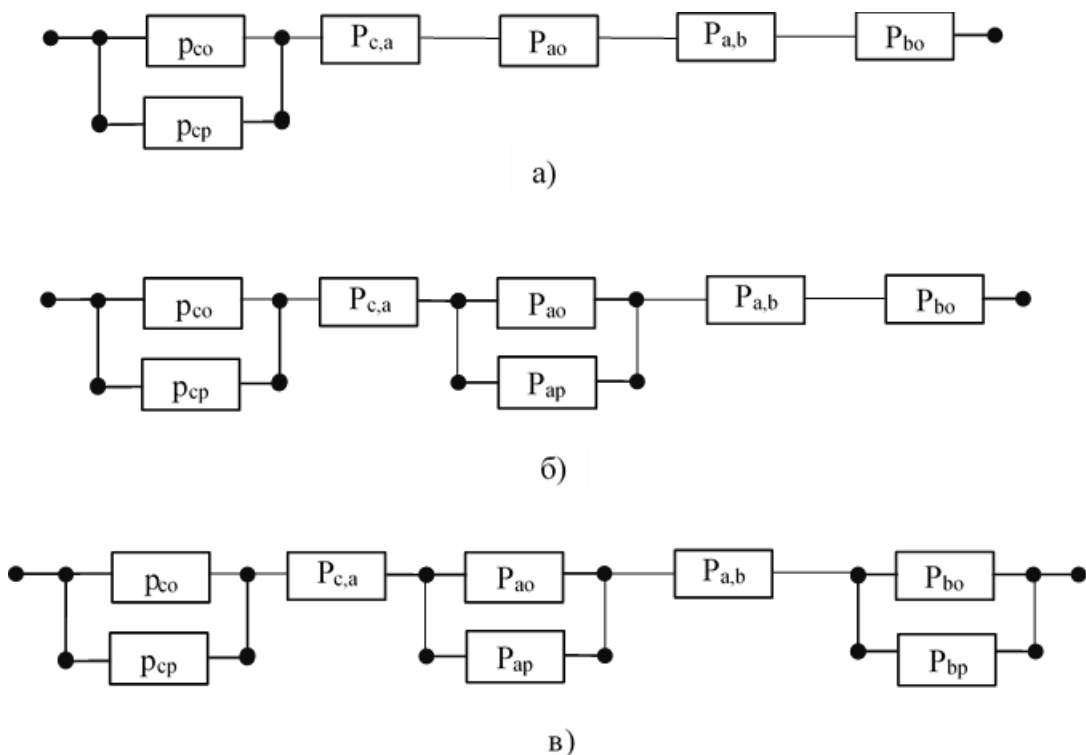


Рис. 2 Блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ для структури з резервуванням: а) центральних вузлів; б) центральних і регіональних вузлів; в) центральних, регіональних і районних вузлів

Оцінимо структурну надійність типового фрагменту ВЦТМ з відповідним варіантом конфігурації резервування вузлів в залежності від імовірності справного

стану $p=0,9\dots0,99$. Оскільки канали зв'язку ДСНС, операторів телекомунікацій та державні канали зв'язку спеціального призначення взаємно резервуються один одним відповідно з кратністю $m_{\text{роз}} = 3$, то справний стан каналів передавання даних визначається формулою (6), іноді його можливо вважати близьким до ідеального

$$P_{c,a} = P_{a,b} = [1 - (1 - p)^3]. \quad (6)$$

Тоді з урахуванням (6) вираз (5) перетворюється до наступного виду

$$\begin{aligned} P_{c,a,b,1}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2] \cdot p^2 \cdot [1 - (1 - p)^3]^2 \\ P_{c,a,b,2}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2]^2 \cdot p \cdot [1 - (1 - p)^3]^2 \\ P_{c,a,b,3}^{\oplus} &= [1 - (1 - p)^2]^3 \cdot [1 - (1 - p)^3]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Отримане вираження (7) описує імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ зображену у вигляді блок-схем надійності для структур з роздільним резервуванням вузлів та каналів зв'язку на Рис. 2, вони дозволяють провести математичне моделювання впливу структури типового фрагменту ВЦТМ на його надійність.

5. Дослідження впливу структури резервування фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі на надійність

Проведемо математичне моделювання для отримання і виявлення залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (7) від надійності вузлів і каналів зв'язку при варіюванні її в межах $p=0,95\dots0,99$ для різноманітної структури резервування вузлів рис. 2 за допомогою системи математичних розрахунків MathCad 14.

Результати математичного моделювання представлені на рис. 3

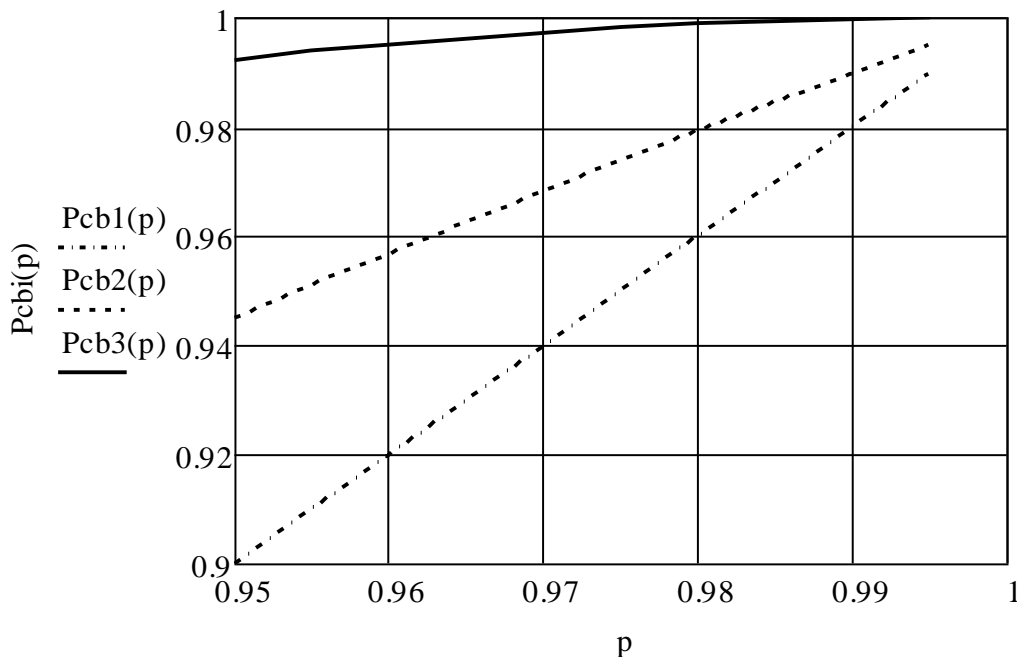


Рис. 3. Графіки залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ $P_{cbi}(p)$ від надійності вузлів і каналів зв'язку при $p=0,95\dots0,999$ при різноманітній структурі резервування вузлів

6. Обговорення результатів математичного моделювання надійності типового фрагменту інформаційно-телекомунікаційних мережі

На основі аналізу літературних даних в розділі 2 встановлена невирішена частина проблеми, на основі якої в розділі 3 поставлені мета і відповідні завдання дослідження.

Для вирішення мети роботи була обрана послідовність проведення досліджень при розподілі на три етапи: обрання структурної схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування, обґрунтування потрібної надійності елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ та розробки імовірнісної моделі й розрахунку структурної надійності типового фрагменту ВЦТМ. При цьому обґрунтування елементної надійності застосовувалось у якості вхідних даних для моделювання структурної надійності типового фрагменту ВЦТМ

Згідно першому етапу досліджень в роботі спочатку була розроблена структурна схема надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування, який забезпечує передачу даних від центрального вузла ВЦТМ ДСНС (основний, резервний) через окремих вузол 1-го рівня (регіонального рівня) до відповідного окремого вузла 2-го рівня (районного рівня) без урахування резервування вузлів та каналів зв'язку (рис. 1).

На другому етапі досліджень виходячи зі структури типового фрагменту ВЦТМ (рис. 1), при урахуванні надійності вершин c , a і b отримана формула (1) для структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ без резервування $P_{c,a,b}^{\oplus}$ у триполісній мережі. Надалі були оцінені вимоги до оціночного значення надійності елемента (вузла, каналу зв'язку) p , для системи з роздільним резервуванням елементів ВЦТМ при мінімальній кратності резервування $m_{\text{роз}} = 2$ за формулою (3). При імовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ $P_{\text{роз}} = 0,995$, $N = 5$, $m_{\text{роз}} = 2$ була розрахована потрібна надійність окремого елемента ВЦТМ, яка склала $p = 0,9684$. Тому інтервал змінювання вхідних даних для подальшого математичного моделювання був обраний у межах $p = 0,95 \div 1$.

На третьому у етапі досліджень були розроблені блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ для структури з резервуванням центральних вузлів, центральних і регіональних вузлів та центральних, регіональних і районних вузлів (рис. 2).

Надалі на основі розроблених блок-схем надійності для структур з роздільним резервуванням вузлів та каналів зв'язку виведені математичні формули (7), які описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ та були застосовані для математичного моделювання впливу структури типового фрагменту ВЦТМ на його надійність.

Результати математичного моделювання впливу структури типового фрагменту ВЦТМ на його надійність представлені на Рис.3 у вигляді наведених графіків залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ при резервуванні тільки центральних вузлів $P_{\text{cab1}}(p)$, що відповідає блок-схемі надійності рис.2 а), з резервуванням центрального і регіонального вузлів $P_{\text{cab2}}(p)$ по блок-схемі надійності рис. 2 б) та у випадку резервування усіх вузлів центрального, регіонального і районного $P_{\text{cab3}}(p)$ для блок-схеми надійності рис. 2 в). На рис. 3 по осі ординат відкладені розрахункові значення імовірностей справного стану типового фрагмента ВЦТМ $P_{\text{cab1}}(p)$, $P_{\text{cab2}}(p)$, $P_{\text{cab3}}(p)$ в залежності від зміни імовірності справного стану елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ, яка змінюється в межах $p = 0,95 \div 1$.

Результати розрахунків $P_{cbi}(p)$, які приведені на Рис.3, свідчать що імовірність справного стану типового фрагмента ВЦТМ для обраних входних даних знаходиться у межах від 0,9 до 0.9999 та має тенденцію до збільшення при підвищенні надійності елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ р.

На Рис.3 спостерігається ще одна закономірність коли при однакових значеннях імовірності безвідмовної роботи елемента ВЦТМ р, імовірності справного стану типових фрагментів ВЦТМ з резервуванням порівнюються відповідно нерівності $P_{cab3}(p) > P_{cab2}(p) > P_{cab1}(p)$.

При цьому, як свідчать результати моделювання на Рис.3 потрібний рівень надійності типового фрагмента $P_{ВЦТМ} = 0,995$ для $P_{cab3}(p)$ досягається при $p=0,95\dots0.999$, для $P_{cab2}(p)$ при $p=0,985\dots0.999$, для $P_{cab1}(p)$ при $p=0,995\dots0.999$.

Основними позитивними рисами отриманих результатів досліджень є застосування наочної і зручної форми опису мережевої надійності на основі використання методу блок-схем надійності. Коло застосування представленої методики досліджень обмежено розглянутим переліком конкретно обраних структур резервування типових фрагментів ВЦТМ. На перспективу представляє інтерес дослідити не розглянуту в даній роботі залежність надійності функціонування типових фрагментів ВЦТМ від інтенсивності відмов і інтенсивності відновлення за результатами експлуатації. Подальша проблема виникла у процесі обговорення результатів досліджень, але вона виходить за рамки указаної мети представленої роботи і можливо буде досліджена авторами при продовженні даної тематики в наступній статті.

7. Висновки

1. На основі аналізу призначення, умов роботи складових елементів, ієрархичності структури ВЦТМ ДСНС можливо розглядати як сукупність типових фрагментів. Структура типового фрагменту ВЦТМ представлена у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка складається з центрального, регіонального і районного вузлів, послідовно з'єднаних каналами зв'язку. При вимогах до значення структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ не менш за 0,995, обґрунтовані потрібні значення ймовірностей безвідмовної роботи кожного елемента типового фрагменту ВЦТМ, яке повинне досягати величини 0,9999, що пред'являє дуже жорсткі вимоги до надійності елементів типового фрагменту ВЦТМ. Тому, щоб знизити ці вимоги обґрунтована потрібність застосування структурного роздільного двократного резервування вузлів типових фрагментів ВЦТМ з різними ступенями ієрархії на етапі проектування ВЦТМ. Для дослідження структурної надійності типових фрагментів ВЦТМ з резервуванням як раз і розроблена імовірнісна модель типового фрагменту ВЦТМ у вигляді блок-схем надійності для структур з двократним резервуванням центральних, регіональних районних вузлів і каналів зв'язку та відповідних виражень для дослідження впливу структури типового фрагменту ВЦТМ на його надійність шляхом математичного моделювання. Отримана імовірнісна модель дозволяє прогнозувати структурну надійність типового фрагменту відомчої ВЦТМ в умовах реагування і ліквідації наслідків НС.

2. Проведене статистичне математичне моделювання з дослідження залежності імовірності справного стану типового фрагменту ВЦТМ ДСНС від показників надійності елементів (вузлів і каналів зв'язку) при їх роздільному резервуванні у складі типового фрагменту ВЦТМ, яке показує, що імовірність справного стану

типового фрагменту ВЦТМ знаходиться у межах від 0,9 до 0,999, при значеннях імовірності безвідмовної роботи елемента ВЦТМ від 0,95 до 0,995.

При однакових значеннях імовірності безвідмовної роботи елемента ВЦТМ наприклад при $p=0,98$, імовірність справного стану типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням центральних вузлів складає $P_{cab1}(p)=0,96$, з резервуванням центральних і регіональних вузлів дорівнює $P_{cab2}(p)=0,98$ та з резервуванням центральних, регіональних і районних вузлів досягає $P_{cab3}(p)=0,998$, тому структурні надійності фрагментів ВЦТМ порівнюються відповідно нерівності $P_{cab3}(p) > P_{cab2}(p) > P_{cab1}(p)$.

Потрібний рівень надійності типового фрагмента $P_{ВЦТМ} = 0,995$ для структури з резервуванням вузлів на всіх рівнях ієрархії досягається при $p=0,95\dots 0,999$, для структури з резервуванням центральних і регіональних вузлів при $p=0,985\dots 0,999$, для структури з резервуванням тільки центральних вузлів при $p=0,995\dots 0,999$.

Таким чином для підвищення імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ на етапі проектування доцільно обирати структури з двократним резервуванням вузлів як мінімум на центральному рівні, як максимум на всіх рівнях, та розраховуючи на проміжні значення надійності при резервуванні вузлів центрального та регіонального рівня.

Література

1. Qadir J., Hasan O. Applying formal methods to networking: Theory, techniques, and applications, *Communications Surveys & Tutorials* 17 (1). 2015. P. 256–291. doi: 10.1109/COMST.2014.2345792
2. Bistouni F., Jahanshahi M. Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability, *Journal of Parallel and Distributed Computing*. V. 75. 2015. P. 168–183. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.08.005
3. Wäfler J., Heegaard P. E. A combined structural and dynamic modelling approach for dependability analysis in smart grid, in: *ACM Symposium on Applied Computing*, ACM. 2013. P. 660–665. doi: 10.1145/2480362.2480489
4. Bistouni F., Jahanshahi M. Analyzing the reliability of shuffle-exchange networks using reliability block diagrams, *Reliability Engineering & System Safety*. V. 132. 2014. P. 97–106. doi: 10.1016/j.res.2014.07.012
5. Lima M. A. de QV, Maciel P. R., Silva B., Guimaraes A. P. Performability evaluation of emergency call center, *Performance Evaluation*. V. 80. 2014. P. 27–42. doi:10.1016/j.peva.2014.07.023
6. Ahmed W., Hasan O., Pervez U., Qadir J. Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks, *Journal of Network and Computer Applications*. V. 78. 2017. P. 191–215. doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.008
7. Todinov M. T. *Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks*, Book, Oxford Brookes University, Oxford, UK. 2013. 320 p. URL: <https://www.amazon.com/Flow-Networks-Optimization-Repairable-Reliability-ebook/dp/B00BBTIXUI>
8. Sedaghatbaf A., Abdollahi Azgomi M. A method for dependability evaluation of software architectures. *Computing*. V. 100. 2018. P. 119–150. doi: 10.1007/s00607-017-0568-3
9. Maza S., *Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-civil security*. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

tolerant systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. V. 228 (3). 2014. P. 243–253. doi: 10.1177/1748006X14525772

10. Борисова Л. В., Загора О. В., Фещенко А. Б. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. Problems of Emergency Situations. 2020. № 1(31). P. 34–43. doi: 10.5281/zenodo.3901945

A. Feshchenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
A. Zakora, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department
L. Borysova, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE PROBABILITY MODEL OF A TYPICAL FRAGMENT OF THE DEPARTMENTAL DIGITAL TELECOMMUNICATIONS NETWORK OF THE SESU

An analysis of the purpose, operating conditions of the components, the hierarchy of the structure of the departmental digital telecommunications network of the State Emergency Service of Ukraine, which is considered as a set of typical network fragments. The structure of a typical fragment of a departmental digital telecommunication network is presented in the form of a structural scheme of reliability without redundancy, which consists of central, regional and district nodes connected in series by communication channels. The required values of the probability of failure-free operation of nodes and channels of the departmental digital telecommunications network depending on the required value of the structural reliability of the typical fragment are substantiated. The application of structural separate double redundancy of nodes with different degrees of hierarchy for typical fragments is proposed in order to simultaneously reduce the requirements for the reliability of nodes of the departmental digital telecommunications network. A probabilistic model of a typical fragment of a departmental digital telecommunication network in the form of block diagrams of reliability for structures with multiple redundancy of central, regional district nodes and communication channels is developed. Analytical expressions for studying the influence of the structure of a typical fragment of a departmental digital telecommunication network on its reliability by statistical mathematical modeling are obtained. Analytical and graphic materials of statistical mathematical modeling on research of dependence of probability of a serviceable condition of a typical fragment of a departmental telecommunication network on structure of a typical fragment with redundancy and reliability of the corresponding network nodes and communication channels are resulted. It is advisable to choose structures with double node redundancy at least at the central level, at most at all levels, and counting on intermediate values of reliability when reserving nodes of central and regional level in order to increase the probability of good condition of a typical fragment of the departmental digital telecommunications network.

Keywords: digital telecommunication network, reliability, probability of trouble-free operation, emergency situation

References

1. Qadir, J., Hasan, O. (2015). Applying formal methods to networking: Theory, techniques, and applications, Communications Surveys & Tutorials, 17 (1), 256–291. doi: 10.1109/COMST.2014.2345792
2. Bistouni, F., Jahanshahi, M., (2015). Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability, Journal of Parallel and Distributed Computing, 75, 168–183. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.08.005
3. Wäfler, J., Heegaard, P. E. (2013). A combined structural and dynamic modeling approach for dependability analysis in smart grid, in: ACM Symposium on Applied Computing, ACM, 660–665. doi: 10.1145/2480362.2480489
4. Bistouni, F., Jahanshahi, M., (2014). Analyzing the reliability of shuffleexchange networks using reliability block diagrams, Reliability Engineering & Sys-

tem Safety, 132, 97–106. doi: 10.1016/j.ress.2014.07.012

5. Lima, M. A. de QV, Maciel, P. R., Silva, B., Guimaraes, A. P., (2014). Performance evaluation of emergency call center, Performance Evaluation, 80, 27–42. doi: 10.1016/j.peva.2014.07.023

6. Ahmed, W., Hasan, O., U. Pervez, J. Qadir, (2016). Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks, Journal of Network and Computer Applications, 78, 191–215. doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.008

7. Todinov, M., (2013). Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks, Book, Oxford Brookes University, Oxford, UK, 320 p. URL: <https://www.amazon.com/Flow-Networks-Optimization-Repairable-Reliability-ebook/dp/B00BBTIXUI>

8. Sedaghatbaf, A., Abdollahi Azgomi, M. (2018) A method for dependability evaluation of software architectures. Computing, 100. 119–150. doi: 10.1007/s00607-017-0568-3

9. Maza, S., (2014). Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 228 (3), 243–253. doi: 10.1177/1748006X14525772

10. Borysova, L. V., Zakora, O. V., Feshchenko, A. B., (2020). Rozrobka imovirnisnoyi modeli elementarnoho frahmenta vidomchoyi informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi // Problems of Emergency Situations, 1(31), 34–43. doi: 10.5281/zenodo.3901945

Надійшла до редколегії: 9.04.2021

Прийнята до друку: 15.04.2021