

УДК 621.395

А. Б. Фещенко, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)

О. В. Загора, к.т.н., доцент, 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

УДОСКОНАЛЕННЯ ІМОВІРНІСНОЇ МОДЕЛІ ТИПОВОГО ФРАГМЕНТА ВІДОМЧОЇ ЦИФРОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ДСНС

Проведений аналіз умов роботи складових елементів, ієрархії структури відомчої цифрової телекомунікаційної мережі дозволяє розглядати її як сукупність типових фрагментів, які виконані без резервування, так і з багатократним резервуванням центральних, регіональних, районних вузлів з'єднаних каналами зв'язку, для яких розроблені блок-схеми надійності та імовірнісні моделі з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів вказаних елементів. Показано, що потрібна надійність телекомунікаційної мережі досягається підвищенням надійності її елементів і кратності резервування, при цьому невизначений вплив на це режиму технічного обслуговування обладнання, тому робляться дослідження залежності ймовірності справного стану типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів елементів типового фрагменту без резервування та з резервуванням відповідних мережевих вузлів і каналів зв'язку, що приводяться у вигляді аналітичних й графічних матеріалів статистичного математичного моделювання. В результаті досліджень встановлено, що з метою зниження вимог до надійності елементів типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі достатньо застосовувати структурне роздільне двократне резервування вузлів різних ступенів ієрархії при наявності трикратного резервування каналів зв'язку. Дані досліджень корисні і важливі для підвищення імовірності справного стану типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі як на етапі проектування шляхом обирання структури і кратності резервування вузлів не тільки на центральному рівні, а також на вузлах регіонального та районного рівня, що дозволяє під час експлуатації планувати потрібний режим технічного обслуговування вузлів і каналів зв'язку в залежності від співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову.

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

1. Вступ

Підвищення оперативності та якості оперативно-диспетчерського управління силами та засобами ДСНС під час реагування та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС), аварій, катастроф, стихійного лиха, гасіння пожеж, рятування людей забезпечує відомча цифрова телекомунікаційна мережа (ВЦТМ) ДСНС, як функціональна підсистема Єдиної інформаційної системи МВС України. Імовірність безвідмовної роботи типових фрагментів ВЦТМ залежить від інтенсивності відмов елементів (вузлів та каналів зв'язку) та обраної структури типових фрагментів ВЦТМ з відсутністю або наявністю резервування.

В умовах ліквідації наслідків НС у режимі пікового навантаження під впливом електричних перевантажень зростає інтенсивність відмов, що може приводити до тривалих затримок, які формують певну інтенсивність відновлення роботи 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] наведено формальні методи аналізу безвідмовної роботи телекомунікаційної мережі. Розглядається класифікація відмов і перелік телекомунікаційної апаратури, підданої відмовам в умовах перенавантаження. Умови перенаванта-

ження 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 враховувався вплив структури резервування вузлів та каналів зв'язку на надійність типового фрагменту телекомунікаційної мережі та не 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. Однак, оціночні чисельні розрахунки параметрів 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 коефіцієнта 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 та експлуатаційних параметрів не застосовувались та оціночні чисельні розрахунки не проводились.

У [4] розглядається 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 двополюсної мережі, однак, вивчення впливу експлуатаційних параметрів і оптимізація структури типових фрагментів телекомунікаційної мережі для підвищення надійності не розглядалось.

У [5] проведена оцінка працездатності центру екстреного виклику на основі використання неоднорідної й ієрархічної стратегії моделювання (RBD і SPN) за критерієм доступності й мінімізації часу простою пропущених дійсних викликів, було проаналізовано випадки з відмовами телекомунікаційних мереж. Для зменшення часу простою авторами запропоновано модернізувати архітектуру телекомунікаційних мереж. При цьому, оцінні розрахунки надійності елементарних telecommunications and radio engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

фрагментів телекомунікаційних мереж і аналіз впливу експлуатаційних параметрів та введення резервування на надійність 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. Однак, представлені рекомендації для застосування математичних, аналітичних і формальних методів аналізу мереж зв'язку, конкретних результатів моделювання впливу експлуатаційних параметрів та резервування на надійність типових фрагментів мереж зв'язку не доведено.

У [7] представлена теорія відновлення працездатності ВЦТМ з порушеннями потоку, викликаними збоями компонентів у потокових ВЦТМ, представлені найшвидші алгоритми оптимізації потоку в ВЦТМ після збоїв або перевантажень із можливістю повторної оптимізації потоків ВЦТМ за рахунок високої обчислювальної швидкості оптимального управління дуже більшими й складними мережами в режимі реального часу, що зводить до мінімуму перебоїв в потоці, викликані збоями. Між тим розробка, аналіз впливу експлуатаційних параметрів на надійність типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі та моделювання надійності не проводились.

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, що здійснюються у профілі DAM не дозволяє прогнозувати імовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ під час реагування і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС). 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 під час реагування і ліквідації наслідків НС. У [10] розроблена імовірнісна модель прогнозування структурної ймовірності безвідмовної роботи елементарного фрагмента ВЦТМ залежно від показників безвідмовності та ремонтпридатності, яка складається з двох вузлів і каналу зв'язку між ними. Але аналіз впливу експлуатаційних параметрів безвідмовності та ремонтпридатності окремих елементів на надійність різноманітних варіантів структури резервування типового фрагмента ВЦТМ в даній роботі не проводився.

У [11] розроблена імовірнісна модель прогнозування структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ залежно від кратності резервування, яка складається з трьох ієрархічних вузлів і каналів зв'язку між ними. Аналіз впливу експлуатаційних параметрів безвідмовності та ремонтпридатності окремих елементів типового фрагментів ВЦТМ з урахуванням структури резервування вузлів та каналів зв'язку на їх надійність в даній роботі не проводився.

У зв'язку із цим, невирішеною частиною проблеми є недосконалість імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі по урахуванню впливу експлуатаційних параметрів інтенсивності відмов і інтенсивності відновлення за результатами експлуатації окремих елементів на надійність функціонування типових фрагментів ВЦТМ з різноманітною структурою резервування.

3. Мета та завдання дослідження

Мета даного дослідження полягає у розробці імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі враховуючі вплив експлуатаційних параметрів безвідмовності та ремонтпридатності окремих елементів на його надійність для проектування, впровадження та експлуатації відомчої цифрової телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайної ситуації.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання дослідження:

- розробити імовірнісну модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням;
- дослідити вплив експлуатаційних параметрів на надійність фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі.

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

Вираження для імовірності безвідмовної роботи елемента ВЦТМ описується залежністю від нормованих експлуатаційних параметрів у наступному вигляді [10]:

$$P_0(\gamma, \beta) = \frac{\left\{ 1 + \gamma \cdot \exp\left[-\frac{(\gamma+1)}{\gamma} \beta\right] \right\}}{\gamma+1}, \quad (1)$$

де $\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = T_v / T_o$ – співвідношення середнього часу відновлення T_v елемента ВЦТМ, що відмовив, до години наробітку на відмову T_o ; $\beta = \lambda t = T_n / T_o$ – співвідношення типового періоду експлуатації T_n (періоду профілактичних робіт, часу вимушеного простою РЕА елемента ВЦТМ через відсутність необхідних елементів заміни в одиночному комплекті запасних технічних засобів (ОК ЗТЗ) або періоду поповнення ОК ЗТЗ до часу наробітку на відмову T_o .

Удосконалимо структурну схему надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування [11] з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів його елементів (рис. 1).

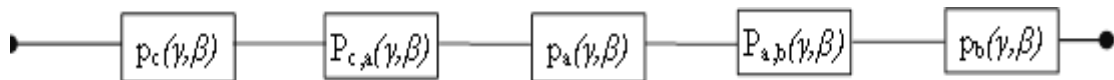


Рис. 1. Структурна схема надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування

На рис. 1 кожному елементу графа вповідають певні ймовірності безвідмовної роботи $p_c(\gamma, \beta)$ – центрального вузла, $p_a(\gamma, \beta)$ – вузла 1-го рівня (регіонального рівня), $p_b(\gamma, \beta)$ – вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів зв'язку $P_{c,a}(\gamma, \beta)$ і $P_{a,b}(\gamma, \beta)$. Прогнозування надійності типового фрагменту 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. Під $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ розуміють імовірність події $E_{c,a,b}$ застати в довільний момент часу між c , a , і b у справному стані хоча б один шлях передачі інформації. 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 $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ триполісної мережі:

$$P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta) = p_c(\gamma, \beta) \cdot P_{c,a}(\gamma, \beta) \cdot p_a(\gamma, \beta) \cdot P_{a,b}(\gamma, \beta) \cdot p_b(\gamma, \beta), \quad (2)$$

де $p_c(\gamma, \beta)$, $p_a(\gamma, \beta)$ і $p_b(c)$ – ймовірності справного стану (коефіцієнти готовності) вузлів ВЦТМ c , a , і b в залежності від нормованих експлуатаційних параметрів; γ, β ; $P_{c,a}(\gamma, \beta)$, $P_{a,b}(\gamma, \beta)$ – ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку типового фрагменту ВЦТМ в залежності від нормованих експлуатаційних параметрів γ, β .

Для оцінки потрібної надійності елементів (вузлів та каналів зв'язку) ВЦТМ прийемо усі елементи типового фрагменту ВЦТМ рівнонадійними $p_c(\gamma, \beta) = P_{c,a}(\gamma, \beta) = p_a(\gamma, \beta) = P_{a,b}(\gamma, \beta) = p_b(\gamma, \beta) = P_0(\gamma, \beta)$, тоді згідно з (1, 2) надійність типового фрагменту ВЦТМ без резервування оцінюється наступним виразом:

$$P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta) = P_0(\gamma, \beta)^5 = \left\{ \frac{\left[1 + \gamma \cdot \exp\left(-\frac{(\gamma+1)}{\gamma} \beta \right) \right]}{\gamma+1} \right\}^5. \quad (3)$$

Значення структурної ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ відповідає умові $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta) \geq 0,995$, це означає, що ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента типового фрагменту ВЦТМ повинні досягати величини $P_0(\gamma, \beta) = \sqrt[5]{P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)} = \sqrt[5]{0,995} = 0,999$. Це дуже жорсткі вимоги до надійності елементів типового фрагменту ВЦТМ (рис. 1).

Як показано в роботі авторів [10, 11] для забезпечення потрібної надійності типового фрагменту ВЦТМ і одночасному зменшенні вимог до надійності його елементів (вузлів), доцільно застосовувати структурне роздільне резервування вузлів з кратністю резервування $m_{\text{роз}} = 2$.

Для дослідження впливу експлуатаційних параметрів на надійність типового фрагменту ВЦТМ удосконалимо блок-схеми надійності для різноманітних конфігурацій з резервуванням вузлів ВЦТМ, розроблених в [11], з урахуванням експлуатаційних параметрів (рис. 2).

Для блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з урахуванням експлуатаційних параметрів для структури з резервуванням (рис. 2) вираз для ймовірності безвідмовної роботи набуде наступного вигляду (4):

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

де $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ – імовірність безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням центрального вузла відповідно (рис. 2а); $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ – імовірність безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням центральних і регіональних вузлів (рис. 2б); $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ – імовірність безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням центральних, регіональних і районних вузлів (рис. 2в).

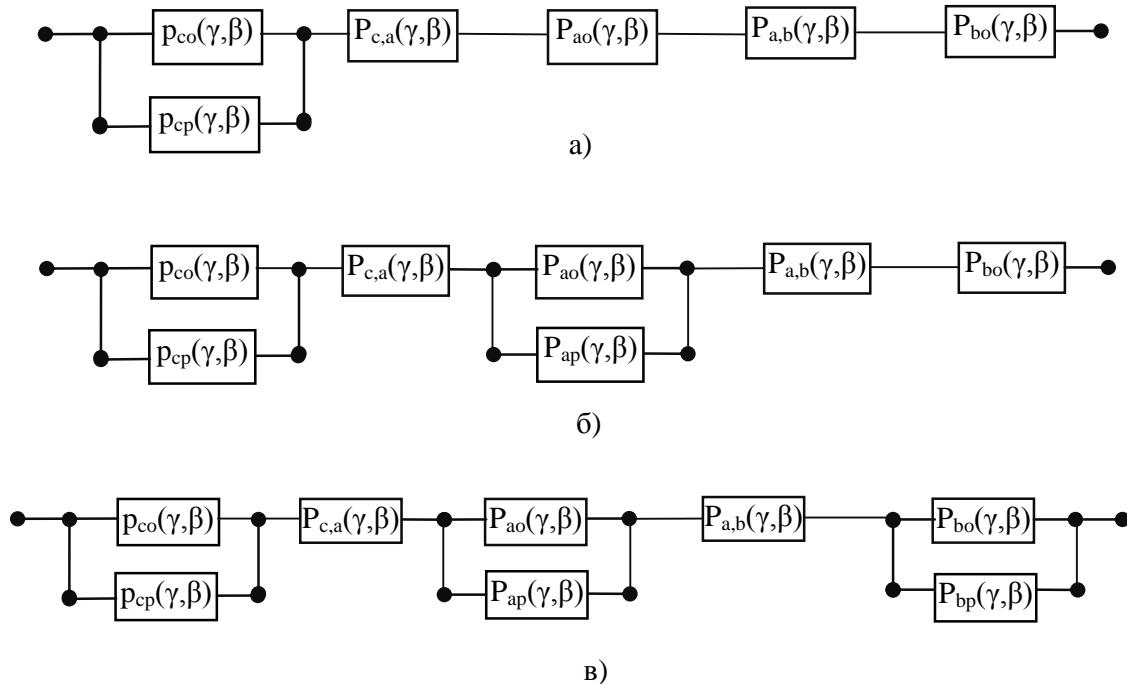


Рис. 2 Блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з урахуванням експлуатаційних параметрів для структури з резервуванням: а) центральних вузлів; б) центральних і регіональних вузлів; в) центральних, регіональних і районних вузлів

Для спрощення оціночних розрахунків припустимо, що усі вузли типового фрагменту ВЦТМ рівнонадійні:

$$P_{co}(\gamma, \beta) = P_{cp}(\gamma, \beta) = P_{ao}(\gamma, \beta) = P_{ap}(\gamma, \beta) = P_{bo}(\gamma, \beta) = P_{bp}(\gamma, \beta) = P_0(\gamma, \beta),$$

тоді вираз (4) перетворюється до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} P_{c,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right] \cdot P_0(\gamma, \beta)^2 \cdot P_{c,a}(\gamma, \beta) \cdot P_{a,b}(\gamma, \beta) \\ P_{c,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right]^2 \cdot P_0(\gamma, \beta) \cdot P_{c,a}(\gamma, \beta) \cdot P_{a,b}(\gamma, \beta) \\ P_{c,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right]^3 \cdot P_{c,a}(\gamma, \beta) \cdot P_{a,b}(\gamma, \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$P_{c,a}(\gamma, \beta) = P_{a,b}(\gamma, \beta) = \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^3\right] \quad (6)$$

Тоді, з урахуванням (6) вираз (5) перетворюється до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right] \cdot P_0(\gamma, \beta)^2 \cdot \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^3\right]^2 \\ P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right]^2 \cdot P_0(\gamma, \beta) \cdot \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^3\right]^2 \\ P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta) &= \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^2\right]^3 \cdot \left[1 - (1 - P_0(\gamma, \beta))^3\right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) описує удосконалену імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ зображену у вигляді блок-схем надійності для структур з роздільним резервуванням вузлів та каналів зв'язку на рис. 2.

Удосконалена імовірнісна модель (7) дозволяє провести математичне моделювання з дослідження впливу нормованих експлуатаційних параметрів на надійність типового фрагменту ВЦТМ для різноманітних структур резервування.

5. Дослідження впливу експлуатаційних параметрів на надійність фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі

На першому етапі дослідження проведемо математичне моделювання для отримання і виявлення залежності імовірності справного стану типового фрагменту ВЦТМ без резервування за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 1) вираз (3) за допомогою системи математичних розрахунків MathCad 14. Результати математичного моделювання представлені на рис. 3.

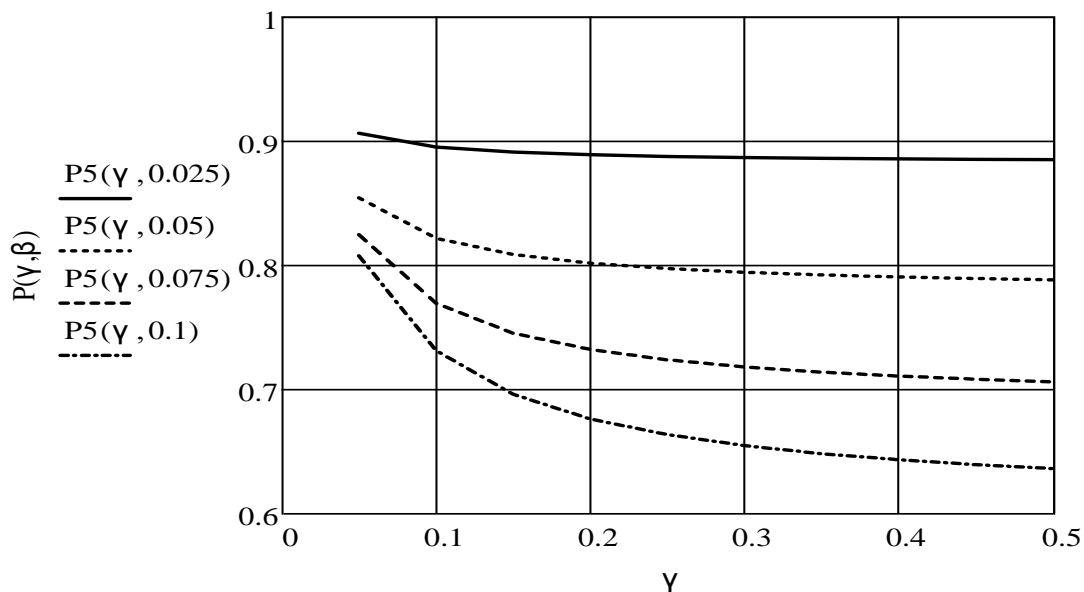


Рис. 3. Графіки залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ без резервування від експлуатаційних параметрів $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$

На другому етапі проведемо математичне моделювання для отримання і виявлення залежності імовірності справного стану типового фрагменту ВЦТМ з різноманітною структурою резервуванням за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 4). Результати математичного моделювання представлені у вигляді наведених графіків залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ від нормованих експлуатаційних параметрів при резервуванні: тільки центральних вузлів, що відповідає блок-схемі надійності (рис. 2 а).

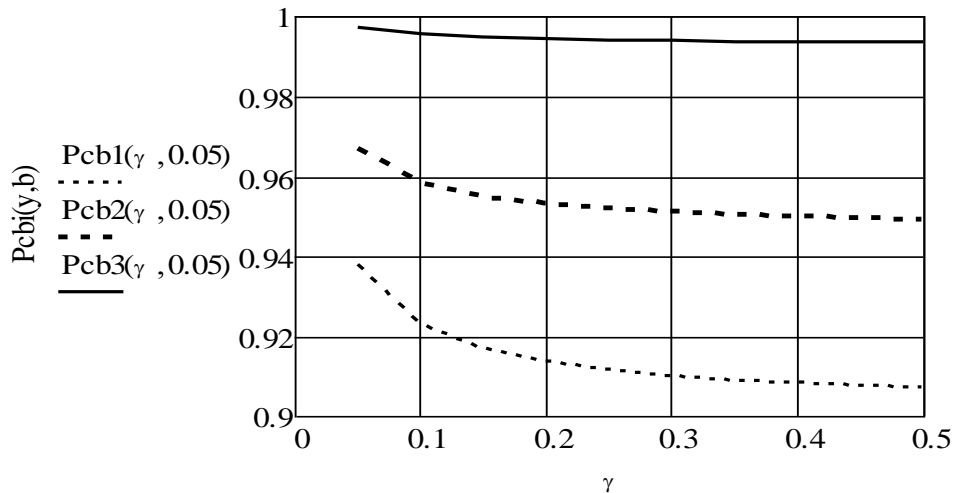


Рис. 4. Графіки залежності імовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ від експлуатаційних параметрів з резервуванням

Вираз (7) також за допомогою системи математичних розрахунків MathCad 14. При цьому, як свідчать результати моделювання на рис. 4 потрібний рівень надійності типового фрагмента $P_{\text{ВЦТМ}} = 0,995$ при значенні нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,05$, досягається тільки для $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

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

На основі аналізу літературних джерел встановлена невирішена частина проблеми, на основі якої поставлені мета і відповідні завдання дослідження.

Для вирішення мети була обрана послідовність проведення досліджень при розподілі на три етапи: удосконалення структурної схеми та імовірнісної моделі надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування та з структурним резервуванням в залежності від експлуатаційних параметрів; математичне моделювання надійності фрагменту ВЦТМ (вузлів та каналів зв'язку) без структурного резервування та з резервуванням в залежності від експлуатаційних параметрів; аналітичне порівняння результатів математичного моделювання надійності типового фрагменту ВЦТМ без резервування та зі структурним резервуванням.

Згідно першого етапу досліджень в роботі спочатку при урахуванні надійності вершин c , a і b триполюсної мережі була розроблена структурна схема надійності типового фрагменту ВЦТМ в залежності від експлуатаційних параметрів без резервування вузлів та каналів зв'язку (рис. 1) та отримана відповідна імовірнісна модель вираз (3) для ймовірності безвідмовної роботи типового фрагменту ВЦТМ без резервування $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

Надалі були удосконалені блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ для структури з резервуванням центральних вузлів, центральних і регіональних вузлів та центральних, регіональних і районних вузлів (рис. 2) з урахуванням експлуатаційних параметрів.

На основі розроблених блок-схем надійності для структур з роздільним резервуванням вузлів та каналів зв'язку (рис. 2) виведені математичні формули (7), які описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ, що були застосова-

ні для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на надійність типового фрагменту ВЦТМ $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

На другому етапі на рис. 3 наведені результати математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів типового фрагменту ВЦТМ без резервування на його надійність. По осі ординат відкладені розрахункові значення ймовірностей справного стану типового фрагмента ВЦТМ без резервування $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ для чотирьох значень нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,025; 0,05; 0,075; 0,01$, параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень $\gamma=0,05 \div 0,5$. Значення ймовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ без резервування знаходяться у межах $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)=0,65 \div 0,91$ та зменшуються при підвищенні нормованого параметра γ . Графіки функції $P_{c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ з підвищенням нормованого експлуатаційного параметра β по осі ординат зміщуються вниз.

На рис. 4 представлені у вигляді наведених графіків залежності ймовірності справного стану типового фрагмента ВЦТМ від нормованих експлуатаційних параметрів при резервуванні: тільки центральних вузлів, що відповідає блок-схемі надійності (рис. 2а), де відповідний графік $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ розраховується по першій формулі блоку (7); з резервуванням центрального і регіонального вузлів $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, по блок-схемі надійності (рис. 2б), де відповідний графік $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ розраховується по другій формулі блоку (7); та у випадку резервування усіх вузлів центрального, регіонального і районного для блок-схеми надійності (рис. 2в), де відповідний графік $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ розраховується по третій формулі блоку (7). По осі ординат відкладені розрахункові значення ймовірностей справного стану типового фрагмента ВЦТМ $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ з резервуванням для середнього значення нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,05$, параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень $\gamma=0,05 \div 0,5$. Результати розрахунків $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, які приведені на рис. 4, свідчать що ймовірність справного стану типового фрагмента ВЦТМ для обраних вхідних даних знаходиться у межах від 0,91 до 0,995 та має тенденцію до зменшення при підвищенні нормованого параметра γ . Також спостерігається ще одна закономірність, коли при однакових значеннях нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,05$, ймовірності справного стану типових фрагментів ВЦТМ з резервуванням порівнюються відповідно нерівності $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta) > P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta) > P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

При цьому, як свідчать результати моделювання на рис. 4 потрібний рівень надійності типового фрагмента $P_{\text{ВЦТМ}} = 0,995$ при значенні нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,05$, досягається тільки для $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

Основними позитивними рисами отриманих результатів досліджень є застосування наочної і зручної форми опису мережевої надійності на основі використання методу блок-схем надійності з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів елементів типових фрагментів ВЦТМ. Коло застосування представленої методики досліджень обмежено розглянутим переліком конкретно обраних структур резервування типових фрагментів ВЦТМ та доступних значень нормованих експлуатаційних параметрів елементів ВЦТМ.

7. Висновки

1. Підтверджена доцільність та можливість розглядати ієрархічну структуру відомчої цифрової телекомунікаційної мережі як сукупність типових фрагментів. Структура типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі представлена у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка складається з центрального, регіонального і районного вузлів, послідовно з'єднаних каналами зв'язку. Удосконалена відповідна імовірнісна модель з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів елементів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. З метою знизити вимоги до надійності елементів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі підтверджена потрібність застосування структурного роздільного двократного резервування вузлів типових фрагментів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з різними ступенями ієрархії на етапі проектування відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. Для дослідження структурної надійності типових фрагментів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням як раз і удосконалена імовірнісна модель типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів його елементів у вигляді блок-схем надійності для структур з двократним резервуванням центральних, регіональних, районних вузлів і трикратним резервуванням каналів зв'язку та відповідно вираженій для дослідження впливу нормованих експлуатаційних параметрів елементів типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі на його надійність шляхом математичного моделювання. Отримана імовірнісна модель дозволяє прогнозувати надійність типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі в залежності від нормованих експлуатаційних параметрів її елементів в умовах реагування і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

2. Проведене статистичне математичне моделювання з дослідженням залежності імовірності справного стану типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів її елементів (вузлів і каналів зв'язку) без резервування та при їх роздільному резервуванні у складі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яке показує, що імовірність справного стану її типового фрагменту без резервування знаходиться у межах від $0,65 \div 0,91$, та суттєво підвищується при резервуванні, де значення імовірності безвідмовної роботи типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі складає інтервал від $0,91 \div 0,995$. При однакових значеннях нормованих експлуатаційних параметрів, наприклад, при $\beta=0,05$, $\gamma=0,2$ імовірність справного стану типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням центральних вузлів складає: $P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)=0,91$, з резервуванням центральних і регіональних вузлів дорівнює: $P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta)=0,95$ та з резервуванням центральних, регіональних і районних вузлів досягає: $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta)=0,995$, тому структурні надійності фрагментів відомчої цифрової телекомунікаційної мережі порівнюються відповідно нерівності: $P_{c,a,b,3}^{\oplus}(\gamma, \beta) > P_{c,a,b,2}^{\oplus}(\gamma, \beta) > P_{c,a,b,1}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, потрібний рівень надійності типового фрагмента $P_{\text{ВЦТМ}}=0,995$ при значенні нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,05$ досягається тільки для структури з резервуванням вузлів на всіх рівнях ієрархії. Для інших структур резервування потрібно за рахунок технічного обслуговування зменшувати нормований експлуатаційний параметр β тобто зменшувати співвід-

ношення період профілактичних робіт $T_{\text{п}}$ до часу наробітку на відмову T_0 . Таким чином, для підвищення імовірності справного стану типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі рекомендовано на етапі проектування обирати структури з двократним резервуванням вузлів не тільки на центральному рівні, а також на вузлах регіонального та районного рівня, а під час експлуатації при технічному обслуговуванні доцільно зменшувати співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову.

Література

1. Qadir J., Hasan O. Applying formal methods to networking: Theory, techniques, and applications, *Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17 (1). 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*. 2015. Vol. 75. 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*. 2014. Vol. 132. P. 97–106. doi:10.1016/j.ress.2014.07.012
5. Marcus A. de Q.V. Lima, Paulo R.M. Maciel, Bruno Silva, Almir P. Guimarães. Performability evaluation of emergency call center. *Performance Evaluation*. 2014. Vol. 80. 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*. 2017. Vol. 78. 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*. 2018. Vol. 100. P. 119–150. doi: 10.1007/s00607-017-0568-3
9. Maza S., Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2014. Vol. 228 (3). P. 243–253. doi: 10.1177/1748006X14525772
10. Борисова Л. В., Закора О. В., Фещенко А. Б. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2020. № 1(31). С. 34–43. doi: <https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.3901945.svg>
11. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 1(33). С. 222–233. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

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

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

The analysis of working conditions of constituent elements, hierarchy of structure of departmental digital telecommunication network allows to consider it as set of standard fragments which are executed without reservation, and with repeated reservation of the central, regional, regional knots connected by communication channels for which block diagrams are developed. reliability and probabilistic models taking into account the standardized operating parameters of these elements. It is shown that the required reliability of the telecommunication network is achieved by increasing the reliability of its elements and multiplicity of redundancy, with uncertain influence on the maintenance of equipment, so studies of the dependence of the probability of good condition of the redundancy of the corresponding network nodes and communication channels and are given in the form of analytical and graphic materials of statistical mathematical modeling. As a result of research it is established that in order to reduce the requirements for the reliability of the elements of a typical fragment of the departmental digital telecommunications network it is enough to use structural separate double redundancy of nodes of different hierarchies in the presence of triple redundancy. Research data are useful and important to increase the probability of good condition of a typical fragment of the departmental telecommunications network as at the design stage by choosing the structure and multiplicity of redundancy nodes not only at the central level but also at regional and district level nodes. maintenance of nodes and communication channels depending on the ratio of the period of preventive maintenance to the time of operation to failure.

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 & System Safety*, 132, 97–106. doi:10.1016/j.ress.2014.07.012
5. Marcus, A., de Q., V., Lima, Paulo, R., M., Bruno M., Silva, Almir, P., Guimarães. (2014). Performability evaluation of emergency call center, *Performance Evaluation*, 80, 27–42. doi:10.1016/j.peva.2014.07.023
6. Ahmed, W., Hasan, O., Pervez U., Qadir, J. (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. 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., Zakora, O., Feshchenko, A., (2020). Rozrobka imovirnisnoyi modeli elementarnoho frahmenta vidomchoyi informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi. *Problems of Emergency Situations*, 1(31), 34–43. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/31/3.pdf>, doi: <https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.3901945.svg>

11. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L., (2021). Rozrobka imovirnisnoyi modeli tipovoho frahmenta vidomchoyi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoyi merezhi DSNS. *Problems of Emergency Situations*, 1(33), 222–233. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/13957>, doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

Надійшла до редколегії: 19.04.2022

Прийнята до друку: 15.06.2022