

УДК 621.395

А. Б. Феценко¹, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)

О. В. Загора¹, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0001-9042-6838)

Є. В. Моріц², д.т.н., головний інспектор (ORCID 0000-0003-0131-2332)

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС, Київ, Україна

ОПЕРАТИВНА ГОТОВНІСТЬ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ФРАГМЕНТУ ВІДОМЧОЇ ЦИФРОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ДСНС

Розроблено імовірнісну модель елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яка враховує вплив структури резервування та експлуатаційних параметрів безвідмовності та ремонтпридатності його вузлів та каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності. Отримані й проаналізовані вираження коефіцієнту оперативної готовності імовірнісної моделі елементарного фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі після відмов в умовах надзвичайної ситуації, установлений взаємозв'язок між коефіцієнтом готовності і експлуатаційними параметрами. Вказано, що потрібний коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі досягається не тільки підвищенням надійності вузлів, а вибором структури резервування та режиму технічного обслуговування обладнання, які до цього невизначені, тому і робляться дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів для структур без резервування та з резервуванням методом статистичного математичного моделювання. В результаті досліджень встановлено, що з метою досягнення потрібного коефіцієнта оперативної готовності при зниженні вимог до надійності вузлів елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі достатньо застосувати структурне роздільне двократне резервування вузлів при наявності трикратного резервування каналів передачі даних. Дані досліджень корисні і важливі для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності при проектуванні та плануванні потрібного режиму технічного обслуговування вузлів і каналів передачі даних елементарного фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі в залежності від співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову під час експлуатації.

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

1. Вступ

В випадках частого знеструмлення електроживлення, пошкодження каналів передачі даних, перезавантаження апаратури елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі (ВЦТМ) ДСНС ефективність його роботи доцільно визначати коефіцієнтом оперативної готовності, що є комплексним показником безвідмовності й відновлюваності та визначає імовірність того, що у момент підключення, або перезавантаження елементарний фрагмент виявиться у працездатному стані і надалі протягом пікового навантаження в умовах надзвичайної ситуації (НС).

Виходячи з вищевикладеного, актуальною проблемою, частина якої вирішується в статті, є недосконалість прикладних методів прогнозування значення коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі по даним показників безвідмовності й ремонтпридатності за час експлуатації в умовах надзвичайної ситуації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [1] наведено формальні методи аналізу безвідмовної роботи телекомуніка-

ційної мережі. Розглядається класифікація відмов і перелік телекомунікаційної апаратури, підданої відмовам в умовах перенавантаження.

Імовірнісна модель телекомунікаційної мережі описується графом, надійності вершин, що характеризується функцією розподілу відмов. Для підтримки працездатності телекомунікаційної мережі авторами пропонується спосіб резервування каналів та вузлів, але коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагменту телекомунікаційної мережі не аналізувався як у випадку без резервування, так і при його наявності.

У [2] 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 коефіцієнта оперативної готовності вузлів та каналів передачі даних елементарних фрагментів телекомунікаційної мережі не проводились та конкретні функції розподілу відмов не застосовувались.

У [3] в інтелектуальних мережах у якості показника для аналізу надійності був запропонований комплексний коефіцієнт працездатності, рівний добутку коефіцієнти готовності, живучості й перешкодозахищеності на основі аналізу розрахунків. Встановлено, що для підвищення рівня постійної готовності інтелектуальних мереж до практичного застосування потрібне скорочення витрат на проведення технічного обслуговування. Однак, імовірнісні моделі прогнозування коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ в залежності від експлуатаційних параметрів не застосовувались, оціночні чисельні розрахунки не проводились.

У [4] для двополюсної мережі передачі даних між центром і пунктами зв'язку, описуваною випадковим графом з використанням блок-схем надійності розроблена методика знаходження ймовірності зв'язку для складних мережевих структур. Імовірнісна модель з урахуванням експлуатаційних параметрів при резервуванні елементарних фрагментів телекомунікаційної мережі для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності авторами не розглядалось.

У [5] проведена оцінка впливу відмов на доступність й мінімізацію часу простою пропущених дійсних викликів центру екстреного виклику телекомунікаційної мережі. При цьому оцінні розрахунки надійності елементарних фрагментів телекомунікаційних мереж і аналіз впливу експлуатаційних параметрів та введення резервування і прогнозування коефіцієнта оперативної готовності елементарних фрагментів ВЦТМ не проводилися.

У [6] авторами наведений огляд методів моделювання й аналізу надійності мереж зв'язку за діаграмами блоку надійності, згідно дереву розламу та ланцюгам Маркова. Однак, конкретних результатів моделювання впливу експлуатаційних параметрів та резервування на коефіцієнт оперативної готовності елементарних фрагментів ВЦТМ не наведено.

У [7, 8] представлені методи моделювання й аналізу надійності програмного забезпечення ВЦТМ, рекомендації з відновлення працездатності ВЦТМ після збоїв або перевантажень. Між тим розробка, аналіз впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагмента ВЦТМ та його моделювання не проводились.

У [9] розроблена методика графоаналітичної оцінки надійності при експлуатації елементарних фрагментів стохастичної мережі. Можливості даної методики не передбачують прогнозування коефіцієнта оперативної готовності елементар-

ного фрагменту ВЦТМ під час реагування і ліквідації наслідків НС.

У [10] розроблена імовірнісна модель елементарного фрагмента ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники безвідмовності та ремонтпридатності. Аналіз впливу експлуатаційних параметрів та резервування на коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагмента ВЦТМ в даній роботі не проводився. У [11, 12] розроблена імовірнісна модель типового фрагменту ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники структуру та кратність резервування, але не дозволяє прогнозувати на коефіцієнт оперативної готовності.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є недосконалість імовірнісної моделі елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі по урахуванню впливу експлуатаційних параметрів інтенсивності відмов і інтенсивності відновлення, отриманих за результатами експлуатації вузлів та каналів зв'язку на коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі при відсутності та наявності резервування.

3. Мета та завдання дослідження

Мета даної роботи полягає у розробці імовірнісної моделі елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яка враховує вплив структури резервування та експлуатаційних параметрів безвідмовності і ремонтпридатності його вузлів і каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності.

Для досягнення мети роботи потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити імовірнісну модель елементарного фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням;
- виявити вплив структури резервування та експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є організація експлуатації вузлів та каналів зв'язку відомчої цифрової телекомунікаційної мережі та недопущення аварійних станів під час експлуатації в умовах надзвичайної ситуації. Гіпотеза дослідження полягає в наявності статистичної залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від експлуатаційних показників і кратності резервування.

В дослідженні при розробці імовірнісної моделі елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі розглядаються припущення, що потоки відмов вузлів та каналів передачі даних елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі є найпростіші та обумовлені законом Пуассона або за моделлю Колмогорова. При математичному моделюванні коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі приймаються спрощення в прийнятті вузлів та каналів передачі даних рівнонадійними. Аналітичні дослідження базуються на методах теорії надійності, а при експериментальних дослідженнях застосованні методи статистичного моделювання за допомогою програмної системи математичних розрахунків MathCad 14 на базі апаратного забезпечення персонального комп'ютера.

Умови проведення експерименту відповідають реальним експлуатаційним показникам, процедури обробки експериментальних даних складаються з аналізу отриманих експериментальних графічних даних, а перевірка адекватності запропонованих моделей підтверджується проведенням одночасного порівняння результатів статистичного моделювання за двома вказаними вище статистичними припущеннями.

5. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням

В умовах відновлення і перезавантаження визначимо коефіцієнт готовності вузла (каналу передачі даних) елементарного фрагменту ВЦТМ [10]:

$$K_r = \frac{T_o}{(T_o + T_b)} = \frac{T_o}{(T_o + T'_b)} \cdot \frac{(T_o + T'_b)}{(T_o + T'_b + T_{\pi})} = K'_r K_{об}, \quad (1)$$

де $K'_r = \frac{T_o}{(T_o + T'_b)} = \frac{1}{(1 + \lambda/\mu)}$ – коефіцієнт готовності апаратури при необмеженому комплекті запасних технічних засобів;

$$K_{об} = \frac{(T_o + T'_b)}{(T_o + T'_b + T_{\pi})} = \frac{1}{\left[1 + \frac{T_{\pi}}{(T_o + T'_b)}\right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{T_{\pi} \cdot \lambda \cdot \mu}{(\lambda + \mu)}\right]} – \text{коефіцієнт забезпеченості}$$

запасних технічних засобів (ЗТЗ); T_{π} – середній час вимушеного простою апаратури через відсутність у ЗТЗ необхідних елементів (час поповнення); T'_b – середній час відновлення апаратури при необмеженому (ідеальному) комплекті ЗТЗ (тобто при відсутності затримок у постачанні); T_o – наробіток на відмову; $\lambda=1/T_o$, $\mu=1/T_b$ – інтенсивності відмов та відновлення вузла (каналу) ВЦТМ.

Перетворимо вирази для коефіцієнта готовності і забезпеченості апаратури ЗТЗ (1) у вигляді функцій від двох відносних змінних γ , β :

$$K'_r(\gamma, \beta) = \frac{1}{(1 + \gamma)}$$

$$K_{об}(\gamma, \beta) = \frac{1}{\left[1 + \frac{T_{\pi} \cdot \lambda}{(1 + \lambda/\mu)}\right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{n_{cp}}{(1 + \lambda/\mu)}\right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\beta}{(1 + \gamma)}\right]}, \quad (2)$$

де $\gamma = \lambda/\mu = T_b/T_o$ співвідношення інтенсивності відмов до інтенсивності відновлення, саме як середнього часу відновлення T_b елемента ВЦТМ, що відмовив, до часу наробітку на відмову T_o ; $n_{cp} = T_{\pi} \cdot \lambda = T_{\pi}/T_o$ – математичне очікування числа відмов апаратури елементарного фрагменту ЦТМ за час поповнення комплекту ЗТЗ; $\beta = \lambda t = T_{\pi}/T_o$ – співвідношення елементарного періоду експлуатації $t=T_{\pi}$ (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).

З урахуванням (1, 2) коефіцієнт готовності $K_r(\gamma, \beta)$ апаратури елемента (вузла або каналу передачі даних) ВЦТМ напишемо у наступному вигляді:

$$K_r(\gamma, \beta) = K'_r(\gamma, \beta) \cdot K_{заб}(\gamma, \beta) = \frac{1}{(1 + \gamma) \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1 + \gamma)} \right]}. \quad (3)$$

Розглянемо вираз для коефіцієнта оперативної готовності $K_{ор}(\gamma, \beta)$ апаратури вузла (каналу передачі даних) ВЦТМ:

$$K_{ор}(\gamma, \beta) = K_r(\gamma, \beta) \cdot P_0(\gamma, \beta) = K'_r(\gamma, \beta) \cdot K_{заб}(\gamma, \beta) \cdot P_0(\gamma, \beta), \quad (4)$$

де $K_r(\gamma, \beta)$, $P_0(\gamma, \beta)$ – коефіцієнт готовності, імовірність безвідмовної роботи апаратури елемента ВЦТМ.

Ймовірність числа відмов вузла (каналу передачі даних) ВЦТМ $P_n(t = T_n)$ за час роботи рівний поповненню комплекту ЗТЗ, обумовлена законом Пуассона [11]:

$$P_n(t = T_n) = \frac{(\lambda T_n)^n}{n!} e^{-\lambda T_n} = \frac{(n_{cp})^n}{n!} \cdot e^{-n_{cp}} = \frac{(\beta)^n}{n!} \cdot e^{-\beta} = \psi(n, \beta), \quad (5)$$

де $n_{cp} = \lambda T_n = \beta$ – математичне очікування кількості відмов; $\psi(n, \beta) = \frac{(\beta)^n}{n!} \cdot e^{-\beta}$ – функція ймовірності.

Ймовірність безвідмовної роботи $P_{он}(t)$ відповідає відсутності відмов в апаратурі елементарного фрагменту ВЦТМ ($n=0$) за час роботи $t=T_n$ (5):

$$P_{он}(\gamma, \beta) = P_{n=0}(t = T_n) = \psi(n = 0, \beta) = \psi(0, \beta) = e^{-\beta}. \quad (6)$$

Враховуючи (1–6) вираз для коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу зв'язку) за відмовами обумовленими законом Пуассона прийме вид:

$$K_{огп}(\gamma, \beta) = K_r(\gamma, \beta) \cdot P_{он}(\gamma, \beta) = \frac{\exp(-\beta)}{(1 + \gamma) \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1 + \gamma)} \right]}. \quad (7)$$

Вираз для ймовірності безвідмовної роботи вузла ВЦТМ за моделлю Колмогорова описується залежністю від нормованих експлуатаційних параметрів у наступному вигляді [12]:

$$P_{ок}(\gamma, \beta) = \frac{\left\{ 1 + \gamma \cdot \exp \left[-\frac{(\gamma + 1)}{\gamma} \beta \right] \right\}}{\gamma + 1}. \quad (8)$$

Тоді коефіцієнт оперативної готовності елемента ВЦТМ за відмовами обу-

мовленими моделлю Колмогорова (8) записується у вигляді:

$$K_{\text{ОГК}}(\gamma, \beta) = K_{\Gamma}(\gamma, \beta) \cdot P_{\text{ок}}(\gamma, \beta) = \frac{\left\{ 1 + \gamma \cdot \exp\left[-\frac{(\gamma+1)}{\gamma} \beta\right] \right\}}{(1+\gamma)^2 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)} \right]}. \quad (9)$$

Апаратура елементарного фрагменту ВЦТМ забезпечує обмін інформацією між посадовими особами відповідних пунктів управління (*c, a*) каналу передачі даних *k* має певну топологію й зв'язану фізичну структуру, та описується графоаналітичною структурою без резервування наведеною на рис. 1.

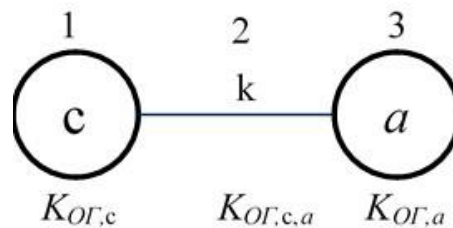


Рис. 1. Структура елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування

На рис. 1 буквами позначені вузли графу *c, a*, канал передачі даних *k*, елементи фрагменту ВЦТМ пронумеровані цифрами 1, 2, 3, кожному елементу графа вповідає коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{ОГ}i}(\gamma, \beta)$.

Імовірнісна модель коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів його елементів представлена на рис. 2.

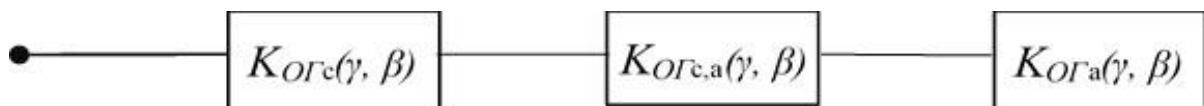


Рис. 2. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування

Виходячи зі структури елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування (рис. 2), при обліку надійності вершин *c* і *a* проведемо обчислення, запишемо вираз для структурного коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ $K_{\text{ОГ},s,a}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ двополюсної мережі за формулою:

$$K_{\text{ОГ},c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ},c}(\gamma, \beta) \times K_{\text{ОГ},c,a}(\gamma, \beta) \times K_{\text{ОГ},a}(\gamma, \beta), \quad (10)$$

де $K_{\text{ОГ},c}(\gamma, \beta)$ і $K_{\text{ОГ},a}(\gamma, \beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності вузлів *c, a*; $K_{\text{ОГ},c,a}(\gamma, \beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності каналу передачі даних *k*.

Для оціночного розрахунку прийемо усі елементи елементарного фрагменту ВЦТМ рівнонадійними $K_{\text{ОГ},c}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ},c,a}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ},a}(\gamma, \beta)$, тоді за відмовами обумовленими законом Пуассона (7, 10) $K_{\text{ОГП},c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ прийме вид:

$$K_{\text{ОГП,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta) = [K_{\text{ОГП}}(\gamma, \beta)]^3 = \frac{(\exp(-\beta))^3}{(1+\gamma)^3 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]^3}, \quad (11)$$

а за відмовами обумовленими, які описуються моделлю Колмогорова (8, 10) $K_{\text{ОГК,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ дорівнює:

$$K_{\text{ОГК,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta) = [K_{\text{ОГК}}(\gamma, \beta)]^3 = \left\{ \frac{\left\{ 1 + \gamma \cdot \exp\left[-\frac{(\gamma+1)\beta}{\gamma}\right] \right\}}{(1+\gamma)^2 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]} \right\}^3. \quad (12)$$

Удосконалимо блок-схему надійності (рис. 2), при структурному роздільному резервуванні вузлів ВЦТМ з кратністю резервування $m_{\text{роз}} = 2$, у вигляді (рис. 3).

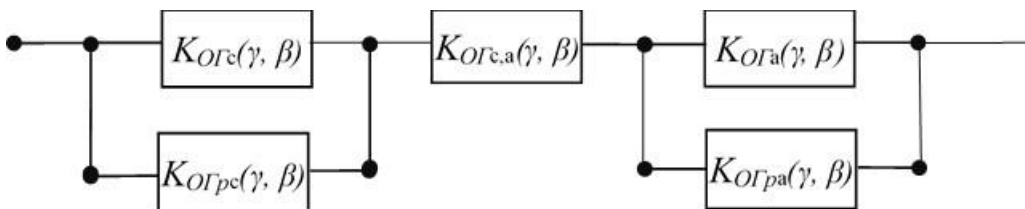


Рис. 3. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ з резервуванням

Вирази для коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ (рис. 3) набуде наступного вигляду:

$$K_{\text{ОГР,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta) = \left[1 - \left(1 - K_{\text{ОГ,со}}(\gamma, \beta) \right) \cdot \left(1 - K_{\text{ОГ,ср}}(\gamma, \beta) \right) \right] \cdot K_{\text{ОГ,с,а}}(\gamma, \beta) \cdot \left[1 - \left(1 - K_{\text{ОГ,ао}}(\gamma, \beta) \right) \cdot \left(1 - K_{\text{ОГ,ар}}(\gamma, \beta) \right) \right]. \quad (13)$$

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

$$K_{\text{ОГ,со}}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ,ср}}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ,ао}}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ,ар}}(\gamma, \beta) = K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta), \quad (14)$$

тоді вирази (13) перетворюються до наступного виду:

$$K_{\text{ОГР,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta) = \left[1 - \left(1 - K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta) \right)^2 \right]^2 \cdot K_{\text{ОГ,с,а}}(\gamma, \beta). \quad (15)$$

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 коефіцієнт оперативної готовності каналу передавання даних визначається формулою:

$$K_{\text{ОГ}_{c,a}}(\gamma, \beta) = \left[1 - (1 - K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta))^3 \right]. \quad (16)$$

Тоді з урахуванням (16), вираз (15) перетворюється до наступного виду:

$$K_{\text{ОГР},c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta) = \left[1 - (1 - K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta))^2 \right]^2 \cdot \left[1 - (1 - K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta))^3 \right]. \quad (17)$$

Отримане вираження (17) описує імовірнісну модель елементарного фрагмента ВЦТМ з резервуванням (рис. 3) та дозволяє провести математичне моделювання з дослідження впливу нормованих експлуатаційних параметрів на його коефіцієнт оперативної готовності.

6. Дослідження коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС

На першому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу) ВЦТМ від експлуатаційних параметрів для виразів (7, 9), результати представлені на рис. 4.

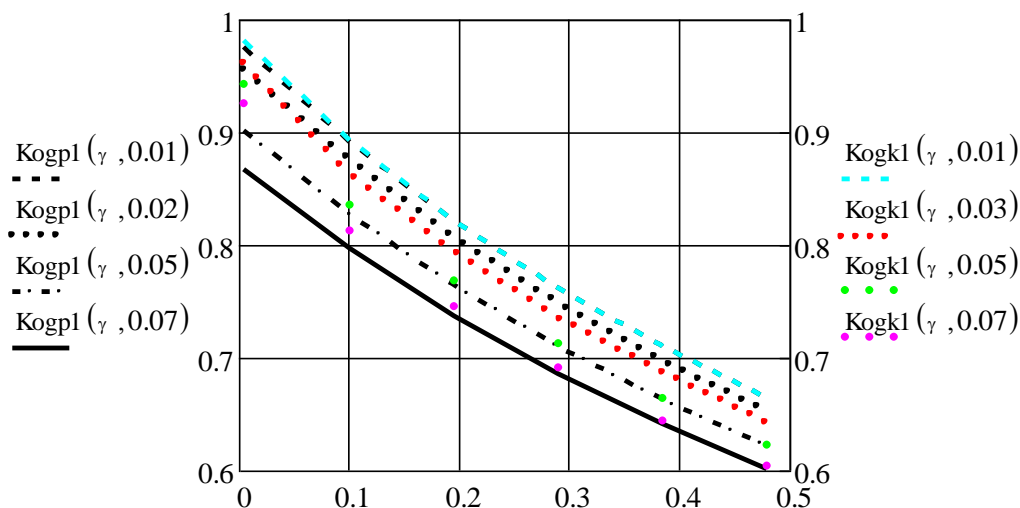


Рис. 4. Залежності коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу) ВЦТМ без резервування $K_{\text{ОГП}}(\gamma, \beta)$, $K_{\text{ОГК}}(\gamma, \beta)$ від експлуатаційних параметрів γ, β

На другому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування від експлуатаційних параметрів за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 1, 2) вираження (11, 12) результати математичного моделювання представлені на рис. 5.

На третьому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ з резервуванням від експлуатаційних параметрів для імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 3) вираження (9, 17), результати представлені на рис. 6.

7. Обговорення результатів математичного моделювання коефіцієнта оперативної готовності фрагменту телекомунікаційної мережі

Особливості запропонованого в роботі методу і отриманих результатів в порівнянні з існуючими полягають в поєднанні синтезу і аналізу імовірнісної моделі зі статистичним моделюванням коефіцієнта оперативної готовності елементарного

фрагменту ВЦТМ при обраної послідовності проведення досліджень, для вирішення мети роботи розподіленої на три етапи: обрання структурної схеми та імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування та з двократним роздільним резервуванням вузлів та каналу зв'язку в залежності від експлуатаційних параметрів; математичне моделювання коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу зв'язку) елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування в залежності від експлуатаційних параметрів; аналітичне порівняння результатів математичного моделювання коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу зв'язку) елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування.

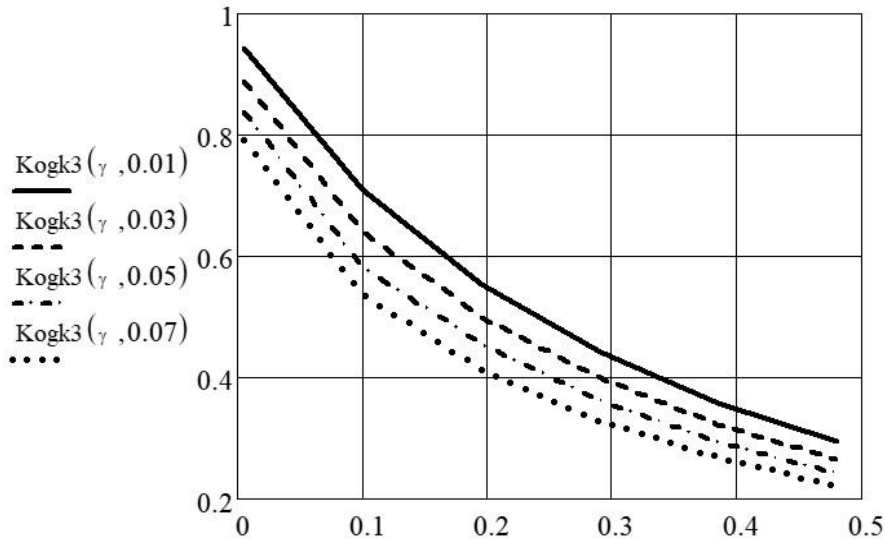


Рис. 5. Залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента ВЦТМ $K_{OGK,c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ без резервування від експлуатаційних параметрів

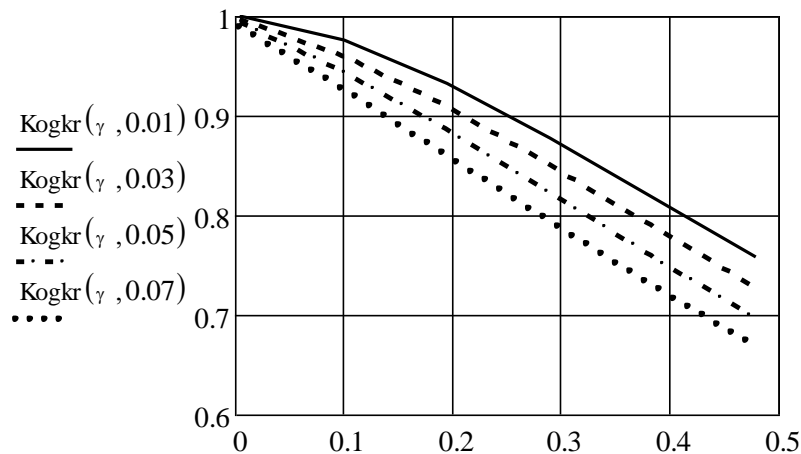


Рис. 6. Залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента ВЦТМ з резервуванням $K_{OGKR,c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ від експлуатаційних параметрів

На першому етапі отриманні порівняльні залежності коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу) ВЦТМ від експлуатаційних параметрів для відмов обумовленими законом Пуассона (7) $K_{OGП}(\gamma, \beta)$ та за моделлю Колмогорова $K_{OGK}(\gamma, \beta)$ (9), що підтверджує адекватність обраних моделей і є перевагами даного дослідження в порівнянні з аналогічними відомими.

Згідно другого етапу досліджень в роботі спочатку при урахуванні коефіцієнта оперативної готовності вузла (каналу зв'язку) s , а двополусної мережі була

розроблена структурна схема надійності елементарного фрагменту ВЦТМ в залежності від експлуатаційних параметрів без резервування вузлів та каналів зв'язку (рис. 1) та отримана відповідна імовірнісна модель (рис. 2) для коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту ВЦТМ без резервування $K_{\text{ОГП,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta)$, $K_{\text{ОГК,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ формули (11, 12).

Надалі на третьому етапі була розроблена блок-схеми надійності елементарного фрагменту ВЦТМ з резервуванням вузлів, та каналу зв'язку (рис. 3) з урахуванням впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності. На основі розробленої блок-схеми надійності (рис. 3) виведена математична формула (17), яка описують імовірнісну модель елементарного фрагмента ВЦТМ з роздільним резервуванням вузлів та каналів зв'язку та застосовується для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності $K_{\text{ОГР,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta)$.

Визначено, що значення коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента ВЦТМ з резервуванням $K_{\text{ОГКР,с,а}}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ від нормованих експлуатаційних параметрів, знаходяться у межах $0,7 \div 0,99$, та зменшуються при підвищенні нормованого параметра $\gamma = 0,005 \div 0,5$. З підвищенням нормованого експлуатаційного параметра $\beta = 0,01 \div 0,07$ по осі ординат графіки зміщаються вниз. При цьому, як свідчать результати моделювання на рис. 6 потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента $R_{\text{ВЦТМ}} = 0,8 \div 0,99$ при значеннях нормованого експлуатаційного параметра $\beta = 0,01 \div 0,07$ досягається тільки при $\gamma = 0,005 \div 0,3$.

Основними позитивними рисами отриманих результатів досліджень є застосування наочної і зручної форми опису мережевого коефіцієнта оперативної готовності на основі використання методу блок-схем надійності з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів вузлів (каналів зв'язку) елементарного фрагменту ВЦТМ. Але, все ж таки цим дослідженням притаманні обмеження пов'язані з відсутністю у авторів можливості проведення фізичного експерименту реєстрування справних станів в роботі елементарного фрагменту ВЦТМ для розрахунку коефіцієнта оперативної готовності при включенні або перезавантаженні, та ще зі зміною структури резервування, тому в роботі застосований метод математичного статистичного моделювання зі спрощенням при допущенні, що усі вузли та канали передачі даних елементарного фрагменту ВЦТМ є рівнонадійні.

До недоліків даного дослідження можуть бути віднесені відсутність урахування ієрархічності структури ВЦТМ яка може бути усунута та полягати в розвитку даного дослідження до рівня типового фрагменту ВЦТМ у складі центрального, регіонального та районного вузлів, і відповідних каналів передачі даних що може бути пов'язане труднощами з якими можна зіткнутися під час математичного синтезу та аналізу коефіцієнта оперативної готовності для різноманітних структур резервування. Тому, за умови подолання вказаних труднощів, коло застосування представленої методики може бути поширено для подальшого дослідження коефіцієнта оперативної готовності типових фрагментів в залежності резервуванні від ієрархічної структури ВЦТМ, в склад якої входять вже досліджені на коефіцієнт оперативної готовності елементарні фрагменти.

8. Висновки

1. Підтверджена доцільність та зручність дослідження структури відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС як сукупності елементарних фрагментів, представлених у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка

складається з двох вузлів, послідовно з'єднаних каналом передачі даних. Розроблена відповідна імовірнісна модель, яка дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з роздільним двократним резервування вузлів з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів в умовах реагування і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

2. Проведене статистичне математичне моделювання з дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів вузлів (каналів передачі даних) без резервування та при їх роздільному резервуванні у складі елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яке показує, що імовірність справного стану її елементарного фрагменту без резервування знаходиться у межах від $0,2 \div 0,96$, та суттєво підвищується при резервуванні де значення ймовірності безвідмовної роботи елементарного фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі складає інтервал від $0,91 \div 0,99$. Потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі $K_{огвцтм} = 0,8 - 0,99$ досягається при значеннях нормованого експлуатаційного параметра $\beta = 0,01 \div 0,07$, тільки при використанні резервуванням вузлів та каналів передачі даних. Для підтримання коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної на високому рівні при технічному обслуговуванні доцільно зменшувати нормований експлуатаційний параметр β , тобто зменшувати співвідношення періоду профілактичних робіт T_p до часу наробітку на відмову T_o . Таким чином, для підвищення коефіцієнта оперативної готовності елементарного фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі рекомендовано на етапі проектування обирати структури з двократним резервуванням вузлів, 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. 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. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Problems of Emergency Situations*. 2020. № 1(31). P. 34–43. URL: <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. *Problems of Emergency Situations*. 2021. № 1(33). P. 222–233. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

12. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. *Problems of Emergency Situations*. 2022. № 1(35). P. 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

A. Feshchenko¹, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department

O. Zakora¹, PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department

Ye. Morshch², DSc, Chief Inspector

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Department of Emergency Prevention of the SES, Kyiv, Ukraine*

OPERATIONAL READINESS OF AN ELEMENTARY FRAGMENT OF THE DEPARTMENTAL DIGITAL TELECOMMUNICATION NETWORK

The research goal of developing a probabilistic model of an elementary fragment of a departmental digital telecommunications network, which takes into account the influence of the redundancy structure and operational parameters of fail-safe and maintainability of its nodes and data transmission channels on its operational readiness coefficient, has been achieved in the work. Expressions of the coefficient of operational readiness of the probabilistic model of an elementary fragment of a digital telecommunication network after failures in emergency conditions were obtained and analyzed, and the relationship between the coefficient of readiness and operational parameters was established. It is indicated that the required coefficient of operational readiness of an elementary fragment of a digital telecommunication network is achieved not only by increasing the reliability of nodes, but also by choosing a redundancy structure and a mode of maintenance of equipment, which have not been determined before, therefore studies are made of the dependence of the coefficient of operational readiness of an elementary fragment of a departmental telecommunications network on standardized operating conditions parameters for structures without redundancy and with redundancy by statistical mathematical modeling. As a result of the research, it was established that in order to achieve the required operational readiness ratio while reducing the requirements for the reliability of the nodes of the elementary fragment of the departmental digital telecommunication network, it is sufficient to apply structurally separate two-fold redundancy of nodes in the presence of triple redundancy of data transmission channels. Research data are useful and important for predicting the operational readiness ratio when designing and planning the required mode of maintenance of nodes and data transmission channels of an elementary fragment

of the departmental telecommunications network, depending on the ratio of the period of preventive work to the time spent on failure during operation.

Keywords: emergency, digital telecommunications network, reliability, operational availability, probability of failure-free operation

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. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L. (2020). Rozrobka imovirnisnoyi modeli elementarnoho frahmenta vidomchoyi informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi. *Problems of Emergency Situations*, 1(31), 34–43. Available at: <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. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17
12. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L. (2022). Udoskonalennia imovirnisnoi modeli tipovoho frahmenta vidomchoyi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoyi merezhi DSNS. *Problems of Emergency Situations*, 1(35), 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

Надійшла до редколегії: 08.03.2023

Прийнята до друку: 17.04.2023