

*А. Б. Феценко, 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)*

*В. О. Собина, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ОПЕРАТИВНА ГОТОВНІСТЬ ТИПОВОГО ФРАГМЕНТУ ВІДОМЧОЇ ЦИФРОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Досліджено імовірнісну модель типового 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. Отримана й проаналізована імовірнісна модель коефіцієнту оперативної готовності типового фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі після відмов в умовах надзвичайної ситуації, установлений взаємозв'язок між коефіцієнтом оперативної готовності і експлуатаційними параметрами. Вказано, що потрібний коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі досягається не тільки підвищенням надійності вузлів, а вибором структури резервування та режиму технічного обслуговування каналів передачі даних, які до цього невизначені, тому і робляться дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів для структур без резервування та з резервуванням каналів передачі даних методом статистичного математичного моделювання. Встановлено, що з метою досягнення потрібного коефіцієнта оперативної готовності при зниженні вимог до надійності вузлів типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі достатньо застосовувати структурне роздільне як мінімум двократне резервування каналів передачі даних, при наявності трикратного резервування каналів передачі даних ефективність також не значно зростає. Дані досліджень корисні для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності при експлуатації та плануванні потрібного режиму технічного обслуговування вузлів і каналів передачі даних типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі в залежності від співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову під час експлуатації.

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

### 1. Вступ

В умовах воєнного стану часто виникають випадки знеструмлення електроживлення, пошкодження каналів передачі даних з необхідністю перезавантаження апаратури типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі (ВЦТМ) ДСНС. Ефективність її 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 роботи у піковому навантаженні в умовах надзвичайної ситуації (НС).

Виходячи з цього, для попередження аварійних станів в роботі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі зростає потрібність розробки достовірних методів прогнозування значення його коефіцієнта оперативної готовності в умовах реагування та ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, що обумовлює актуальність проблеми дослідження.

### 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. Імовірнісна модель те-

лекомунікаційної мережі описується графом, надійності вершин, якого характеризувалися функцією розподілу відмов, для підтримки працездатності телекомунікаційної мережі пропонувався спосіб резервування каналів та вузлів, але прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайної ситуації не проводилось як у випадку без резервування, та 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, але розробка методів прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагментів телекомунікаційної мережі не проводились.

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. якого 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 типового фрагменту ВЦТМ не розроблялись.

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 типових фрагментів телекомунікаційної мережі для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності не розглядалось.

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

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

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 типового 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 типового фрагменту ВЦТМ під час реагування і ліквідації наслідків НС.

У [10] розроблена імовірнісна модель типового фрагмента ВЦТМ, яка урахує експлуатаційні показники безвідмовності та ремонтпридатності. Однак, дана модель не розвинута до рівня прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ.

У [11, 12] розроблені імовірнісна модель вузла, каналу передачі даних та елементарного фрагменту ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники структуру та кратність резервування, але не дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ.

У [13] розроблені імовірнісна модель вузла, каналу передачі даних та елементарного фрагменту ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники структуру та кратність резервування, але вона не дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ при застосуванні різноманітних структур резервування каналів передачі даних.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є недосконалість існуючих імовірнісних моделей для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з урахуванням впливу структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів інтенсивності відмов і інтенсивності відновлення, отриманих за результатами експлуатації вузлів та каналів передачі даних, на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі при відсутності та наявності резервування.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Мета даної роботи полягає у розробці імовірнісної моделі типового 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 і вирішити наступні завдання:

- розробити імовірнісну модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням;
- виявити вплив структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є організація експлуатації вузлів та каналів передачі даних відомчої цифрової телекомунікаційної мережі та недопущення аварійних станів під час експлуатації в умовах воєнного стану під час ліквідації наслідків НС. Гіпотеза дослідження полягає в наявності статистичної залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від експлуатаційних показників і структур резервування каналів передачі даних різноманітної кратності резервування. В дослідженні при розробці імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі розглядаються припущення, що потоки відмов вузлів та каналів передачі даних типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі є найпростіші та обумовлені законом Пуассона або за моделлю Колмогорова. При математичному моделюванні коефіцієнта оперативної готовності типового 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 застосуванні методи статистичного моделювання за допомогою програмної системи математичних розрахунків MathCad 14 на базі апаратного забезпечення персоні-

нального 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 типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням

Апаратура типового фрагменту ВЦТМ забезпечує обмін інформацією між посадовими особами відповідних пунктів управління (с, а, b) каналу передачі даних (са, ab) має певну топологію й зв'язану фізичну структуру, тому імовірнісну модель коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів його елементів можливо представити на рис. 1.

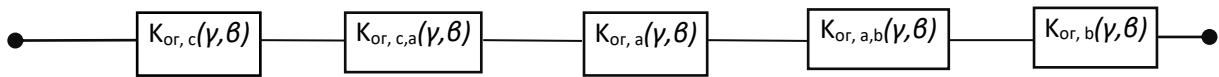


Рис. 1. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування

На рис. 1 кожному елементу схеми відповідають певні коефіцієнти оперативної готовності  $K_{or, c}(\gamma, \beta)$  – центрального вузла,  $K_{or, a}(\gamma, \beta)$  – вузла 1-го рівня (регіонального рівня),  $K_{or, b}(\gamma, \beta)$  – вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів передачі даних  $K_{or, c,a}(\gamma, \beta)$  і  $K_{or, a,b}(\gamma, \beta)$ .

Виходячи зі структури типового фрагменту ВЦТМ без резервування рис. 1, при обліку надійності вершин с, а і b проведемо обчислення структурного коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ  $K_{or, c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta)$  за формулою:

$$K_{or, c,a}^{\oplus}(\gamma, \beta) = K_{or, c}(\gamma, \beta) \cdot K_{or, c,a}(\gamma, \beta) \cdot K_{or, a}(\gamma, \beta) \cdot K_{or, a,b}(\gamma, \beta) \cdot K_{or, b}(\gamma, \beta), \quad (1)$$

де  $K_{or, c}(\gamma, \beta)$ ,  $K_{or, a}(\gamma, \beta)$ ,  $K_{or, b}(\gamma, \beta)$  – коефіцієнти оперативної готовності вузлів с, а, b типового фрагменту ВЦТМ;

$K_{or, c,a}(\gamma, \beta)$ ,  $K_{or, a,b}(\gamma, \beta)$  – коефіцієнти оперативної готовності каналів передачі даних типового фрагменту ВЦТМ.

Як відомо вираження для коефіцієнта оперативної готовності  $K_{or}(\gamma, \beta)$  апаратури вузла (каналу передачі даних) типового фрагменту ВЦТМ в умовах відновлення і перезавантаження визначається наступним вираженням [12]:

$$K_{or}(\gamma, \beta) = K_r(\gamma, \beta) \cdot P_0(\gamma, \beta), \quad (2)$$

де  $K_r(\gamma, \beta) = \frac{1}{(1 + \gamma) \cdot \left[ 1 + \frac{\beta}{(1 + \gamma)} \right]}$ ;  $P_0(\gamma, \beta)$  – коефіцієнт готовності, імовірність безвід-

мовної роботи апаратури вузла або каналу передачі даних ВЦТМ типового фрагменту ВЦТМ;  $\gamma = \lambda\mu = T_b / T_o$  співвідношення інтенсивності відмов до інтенсивності

відновлення, саме як середнього часу відновлення  $T_B$  елемента ВЦТМ, що відмовив, до часу наробітку на відмову  $T_0$ ;  $\beta = \lambda t = T_{\Pi} / T_0$  – співвідношення типового періоду експлуатації  $t=T_{\Pi}$  (періоду профілактичних робіт, часу вимушеного простою РЕА вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ через відсутність необхідних елементів заміни в одиночному комплекті запасних технічних засобів (ОК ЗТЗ) або періоду поповнення ОК ЗТЗ до часу наробітку на відмову  $T_0$ ).

Для оціночного розрахунку коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування прийемо, що його вузли та канали передачі даних рівнонадійні:

$$K_{\text{ОГ,с}}(\gamma\beta) = K_{\text{ОГ,с,а}}(\gamma\beta) = K_{\text{ОГ,а}}(\gamma\beta) = K_{\text{ОГ,а,б}}(\gamma\beta) = K_{\text{ОГ,б}}(\gamma\beta) = K_{\text{ОГ}}(\gamma\beta), \quad (3)$$

$$K_{\text{ОГП}}(\gamma\beta) = \frac{\exp(-\beta)}{(1+\gamma) \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]_{\text{або}}}$$

$$\text{де } K_{\text{ОГК}}(\gamma\beta) = \frac{\left\{1 + \gamma \cdot \exp\left[-\frac{(\gamma+1)\beta}{\gamma}\right]\right\}}{(1+\gamma)^2 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]};$$

$$K_{\text{ОГ}}(\gamma\beta) = \left\{ \left\{ \right\} \right\}$$

$K_{\text{ОГП}}(\gamma\beta)$  – коефіцієнт оперативної готовності вузла (каналу передачі даних) за відмовами обумовленими законом Пуассона [13];  $K_{\text{ОГК}}(\gamma\beta)$  – коефіцієнт оперативної готовності вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ за відмовами обумовленими моделлю Колмогорова [13].

Тоді за відмовами обумовленими законом Пуассона (3) коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування  $K_{\text{ОГП,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  прийме вид:

$$K_{\text{ОГП,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta) = [K_{\text{ОГП}}(\gamma\beta)]^5 = \frac{(\exp(-\beta))^5}{(1+\gamma)^5 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]^5}, \quad (4)$$

а за відмовами обумовленими, які описуються моделлю Колмогорова (3)  $K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  дорівнює:

$$K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta) = [K_{\text{ОГК}}(\gamma\beta)]^5 = \left\{ \frac{\left\{1 + \gamma \cdot \exp\left[-\frac{(\gamma+1)\beta}{\gamma}\right]\right\}}{(1+\gamma)^2 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]} \right\}^5, \quad (5)$$

Однак, як що існують умови передачі даних у будь який час не тільки з використанням можливостей каналів передачі даних ДСНС, а ще й трафіку операторів телекомунікацій та ресурсів державних каналів передачі даних спеціального

призначення, то з точки зору надійності фрагменту ВЦТМ це еквівалентно роздільному резервуванню каналу передачі даних ДСНС хоча б одним або в повному обсязі двома резервними вказаними каналами передачі даних, що відповідно забезпечує кратність резервування  $m_{k,роз}=2, 3$ , тоді їх справний стан роботи визначається формулою (6), яка потім перетворюється до вигляду (7):

$$K_{OG_{c,a}}(\gamma\beta) = K_{OG_{a,b}}(\gamma\beta) = \left[ 1 - \left( 1 - K_{OG_0}(\gamma\beta) \right)^{m_{k,роз}} \right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \left[ K_{OG_0}(\gamma\beta) \right]^{k,роз}, \text{ при } 1; \\ & \left[ 1 - \left( 1 - K_{OG_0}(\gamma\beta) \right)^2 \right]^{k,роз}, \text{ при } 2 \\ & \left[ 1 - \left( 1 - K_{OG_0}(\gamma\beta) \right)^3 \right]^{k,роз}, \text{ при } 3. \\ K_{OG_{c,a}}(\gamma\beta) = K_{OG_{a,b}}(\gamma\beta) = \{ \} \{ \} \{ \}. \end{aligned} \quad (7)$$

Як що розглядати це питання (6, 7) більш детально, то можна помітити, що кратність резервування каналів передачі даних з центрального вузла до вузла 1-го рівня (регіонального рівня) може відрізнятись для випадку передачі даних від вузла 1-го рівня (регіонального рівня) до вузла 2-го рівня (районного рівня), що враховується та описується формулою:

$$K_{OG_{c,a}}(\gamma\beta) = \left[ 1 - \left( 1 - K_{OG_0}(\gamma\beta) \right)^{m_{k,c,a,роз}} \right], \quad K_{OG_{a,b}}(\gamma\beta) = \left[ 1 - \left( 1 - K_{OG_0}(\gamma\beta) \right)^{m_{k,a,b,роз}} \right], \quad (8)$$

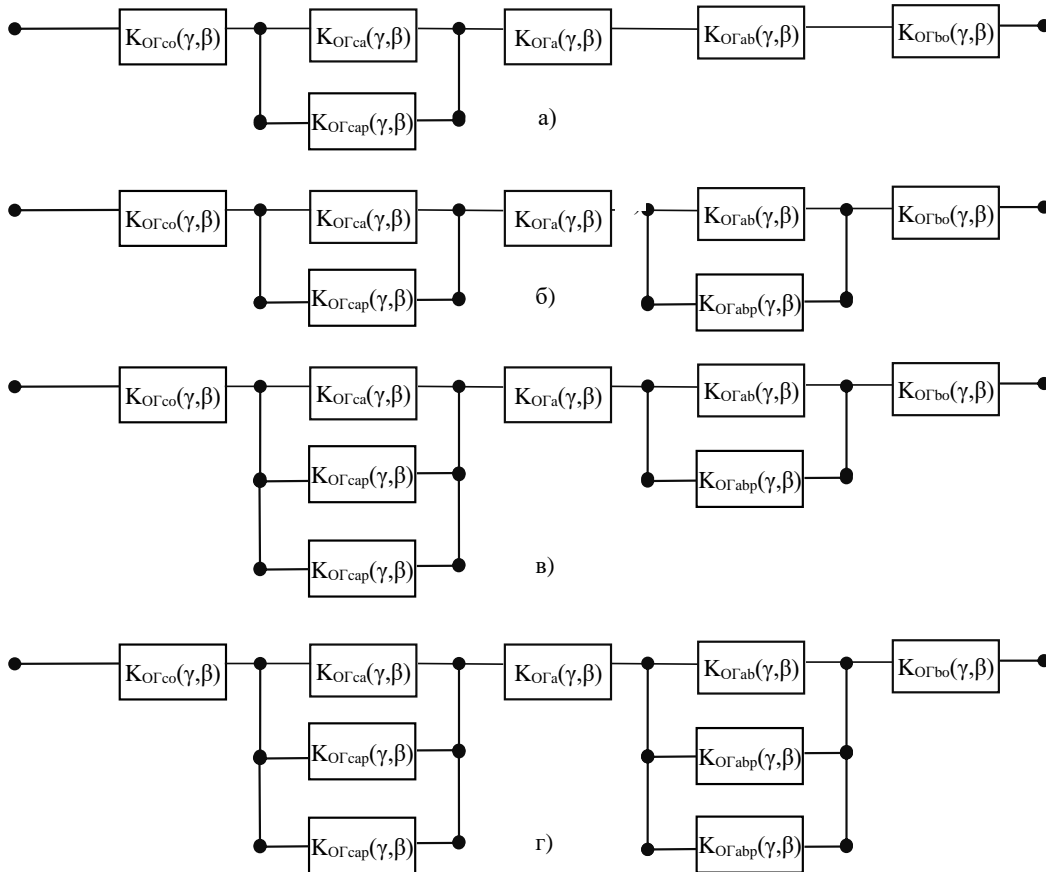
де  $m_{k,c,a,роз}$ ,  $m_{k,a,b,роз}$  – кратність роздільного резервування відповідних каналів передачі даних.

Тоді повинно врахувати залежності (8) при удосконаленні структурної схеми моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування (рис.1).

Так при наявності роздільного резервування каналів передачі даних з різноманітними комбінаціями кратностей резервування  $m_{k,c,a,роз}$ ,  $m_{k,a,b,роз}$  структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ буде мати наступний вигляд (рис. 2).

Відмітимо, що де які комбінації  $m_{k,c,a,роз} : m_{k,a,b,роз}$  на структурній схемі (рис. 2) не розглянуті, але враховані в (9), так комбінація  $m_{k,c,a,роз} : m_{k,a,b,роз} = 1:2$  еквівалентна комбінації  $2:1$ ,  $m_{k,c,a,роз} : m_{k,a,b,роз} = 3:2$  еквівалентна комбінації  $2:3$ , а комбінації  $m_{k,c,a,роз} : m_{k,a,b,роз} = 3:1$  та  $m_{k,c,a,роз} : m_{k,a,b,роз} = 1:3$  еквівалентні між собою та рівні за сумарною кратністю ( $m_{k,c,a,роз} + m_{k,a,b,роз} = 4$ ) з комбінацією  $2:2$  а тому можливо приблизно співпадають за коефіцієнтом оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ, але вірність останнього твердження як допоміжної гіпотези цікаво перевірити під час проведення математичного моделювання за імовірнісної моделі за формулами (3, 9).

З використанням рис. 2 та уточнення (6–8) з урахуванням (2–5) коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів, чому відповідає  $m_{b,роз}=1$  й з резервуванням каналів передачі даних з різноманітними комбінаціями кратностей  $m_{k,c,a,роз}$ ,  $m_{k,a,b,роз}$  буде мати вигляд:



**Рис. 2. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ для структури з резервуванням каналів передачі даних: а –  $m_{кса,роз}=2, m_{каб,роз}=1$ ; б –  $m_{кса,роз}=2, m_{каб,роз}=2$ ; в –  $m_{кса,роз}=3, m_{каб,роз}=2$ ; г –  $m_{кса,роз}=3, m_{каб,роз}=3$**

$$\begin{aligned}
 & \text{в, роз} \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 1, \text{ кса, роз}}^5 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 2, \text{ каб, роз}} = 1; \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 2, \text{ кса, роз}}^4 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 2, \text{ каб, роз}} = 1; \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 2, \text{ кса, роз}}^3 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 2, \text{ каб, роз}}^2 = 2; \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 3, \text{ кса, роз}}^4 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 3, \text{ каб, роз}} = 1; \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 3, \text{ кса, роз}}^3 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 3, \text{ каб, роз}} = 2; \\
 & K_{ОГ}(\gamma\beta)_{\text{при } 3, \text{ кса, роз}}^3 \cdot \left[ 1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma\beta))^2 \right]_{\text{при } 3, \text{ каб, роз}}^2 = 3. \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$K_{ОГ,c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta) = \{ \}$$

де  $K_{ог}(\gamma\beta) = K_{огк}(\gamma\beta)$  або  $K_{ог}(\gamma\beta) = K_{огп}(\gamma\beta)$  – коефіцієнти оперативної готовності вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ за відмовами обумовленими законом Пуассона або за моделлю Колмогорова (3).

Отримані вираження (3, 9) описує імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ (рис. 2), та дозволяє провести математичне моделювання з дослідження впливу нормованих експлуатаційних параметрів та структури резервування каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності.

### 6. Дослідження коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі

На першому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування каналів передачі даних та вузлів від експлуатаційних параметрів за відмовами обумовленими законом Пуассона та моделлю Колмогорова за імовірнісною моделлю рис. 1 формули (3–5), результати представлені на рис. 3.

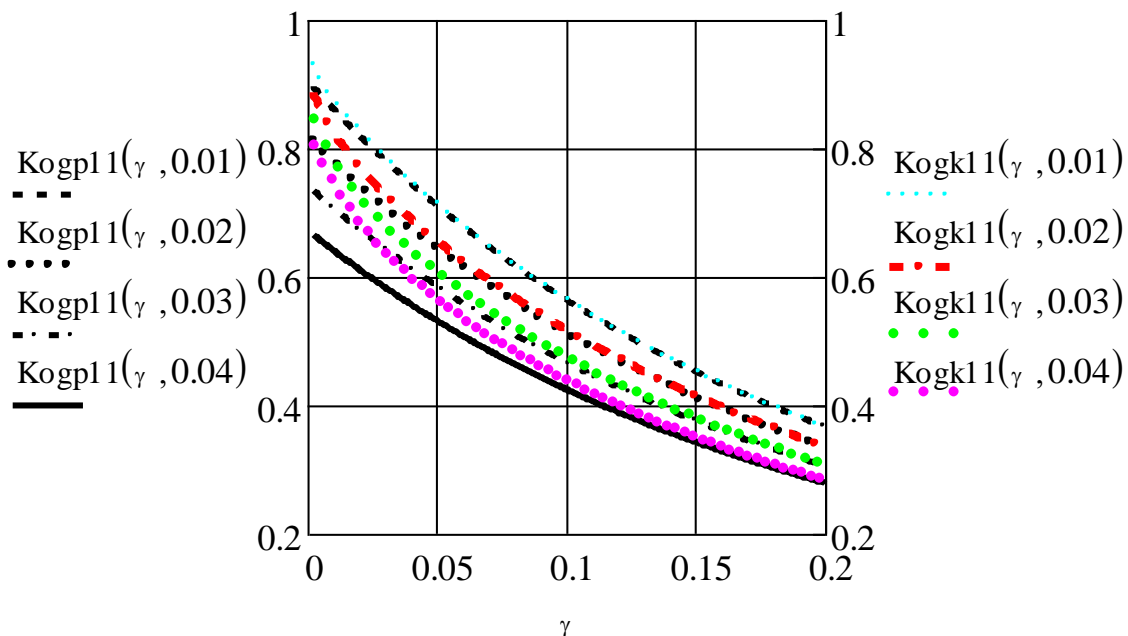


Рис. 3. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування від експлуатаційних параметрів  $\gamma, \beta$

На другому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнту оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та з резервуванням каналів передачі даних від експлуатаційних параметрів за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 1, 2) вираження (3, 9). Результати математичного моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування  $m_{к,са,роз}=m_{к,аб,роз}=1$  та при наявності резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей  $m_{к,са,роз}:m_{к,аб,роз}=2:1; 2:2; 3:1$  представлені на рис. 4.

На рис. 5 представлені результати математичного моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування  $m_{к,са,роз}=m_{к,аб,роз}=1$  та при наявності резервування каналів передачі даних з співвідношенням кратностей  $m_{к,са,роз}:m_{к,аб,роз}=3:1; 2:2; 3:2; 3:3$ .



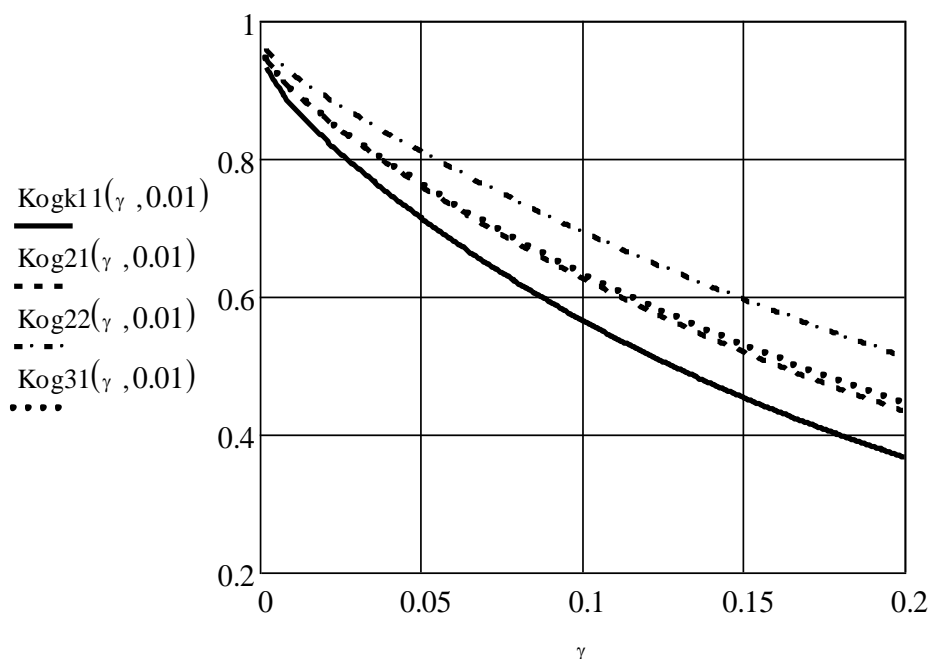


Рис. 4. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування  $m_{\text{кзса,роз}}=m_{\text{кзаб,роз}}=1$  та при резервуванні каналів передачі даних  $m_{\text{кзса,роз}}:m_{\text{кзаб,роз}}=2:1; 2:2; 3:1$

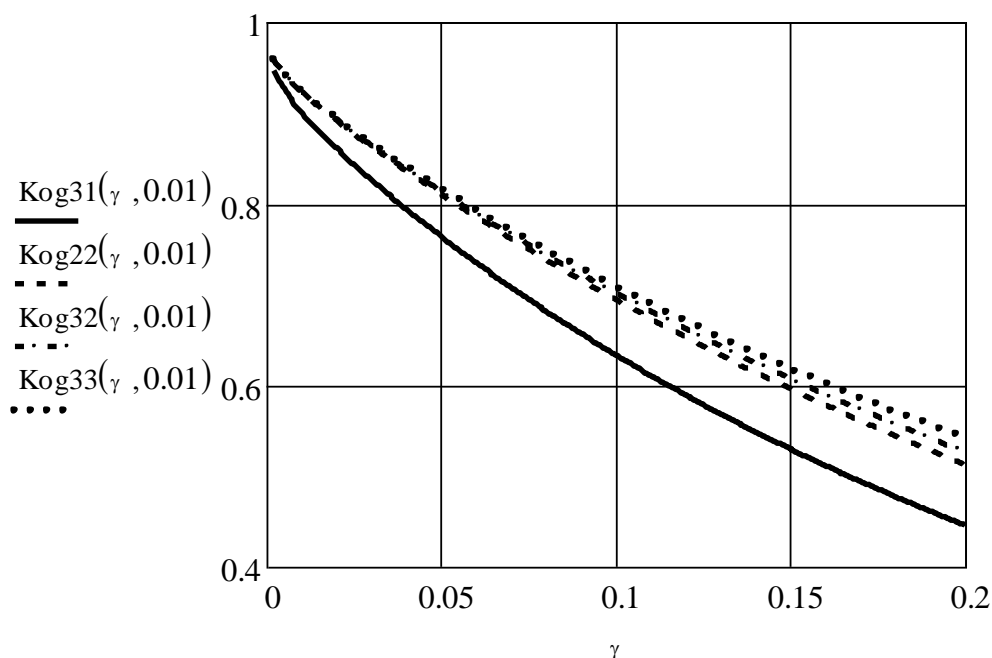


Рис. 5. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування  $m_{\text{кзса,роз}}=m_{\text{кзаб,роз}}=1$  та при резервуванні каналів передачі даних  $m_{\text{кзса,роз}}:m_{\text{кзаб,роз}}=3:1; 2:2; 3:2; 3:3$

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

Отримані результати пояснюються проведеним мета аналізом, де встановлена невіршена частина проблеми, на основі якої в розділі 3 поставлені мета і відповідні завдання дослідження. 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 типового фрагменту ВЦТМ при обраній послідовності проведення досліджень, Telecommunications and Radio Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-17

для вирішення мети роботи розподіленої на три етапи: обрання структурної схеми та імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування та з роздільним резервуванням каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів; математичне моделювання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та експлуатаційних параметрів; аналітичне порівняння результатів математичного моделювання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування, в залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та експлуатаційних параметрів.

На першому етапі досліджень в роботі спочатку при урахуванні коефіцієнтів оперативної готовності вузлів (каналів передачі даних) була розроблена структурна схема імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів (рис. 2) та отримані порівняльні залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування для відмов обумовленими законом Пуассона (3)  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$  (4) та за моделлю Колмогорова (3)  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$  (5) що підтверджує адекватність обраних моделей і є перевагами даного дослідження в порівнянні з аналогічними відомими.

Надалі на другому етапі була розроблена блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням каналів передачі даних (рис. 2) з урахуванням впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності. На основі розробленої блок-схеми надійності (рис. 2) виведена математична формула (9), яка описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ з роздільним резервуванням каналів передачі даних та застосовується для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$ .

На першому етапі на рис. 3 наведені результати математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ для моделі відмов обумовленими законом Пуассона (4) та за моделлю Колмогорова (5).

На рис. 3 по первинній осі ординат ліворуч відкладені розрахункові значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ за статистикою відмов за законом Пуассона  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$ , а по вторинній осі праворуч за моделлю Колмогорова  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$  для чотирьох значень нормованого експлуатаційного параметра  $\beta=0,01; 0,02; 0,03; 0,04$ , параметр  $\gamma$  по осі абсцис змінюється в інтервалі значень  $\gamma=0,005 \div 0,2$ .

На другому етапі на рис. 4, 5 наведені порівняльні результати математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$  без резервування та з резервуванням.

На рис. 4 по осі ординат відкладені розрахункові значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування  $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma\beta)$  для значення нормованого експлуатаційного параметра  $\beta=0,01$ , та при резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей  $m_{k,ca,poz}:m_{k,ab,poz}=2:1; 2:2; 3:1$ ,  $\Phi$  параметр  $\gamma$  по осі абсцис змінюється в інтервалі значень  $\gamma=0,005 \div 0,2$ .

На рис. 5 по осі ординат відкладені розрахункові значення коефіцієнта опе-

ративної готовності типового фрагмента ВЦТМ з резервування  $K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  для значення нормованого експлуатаційного параметра  $\beta=0,01$ , та при резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей  $m_{\text{к,са,роз}}:m_{\text{к,аб,роз}}=3:1; 2:2; 3:2; 3:3$ , параметр  $\gamma$  по осі абсцис змінюється в інтервалі значень  $\gamma=0,005\div 0,2$ .

На рис. 3 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ  $K_{\text{ОГП,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$ ,  $K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  практично не відрізняються один від одного, знаходяться у межах  $0,3\div 0,9$ , та зменшуються при підвищенні нормованого параметра  $\gamma$ . Графіки функції  $K_{\text{ОГП,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$ ,  $K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  з підвищенням нормованого експлуатаційного параметра  $\beta$  по осі ординат зміщуються вниз.

На рис. 4 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування  $K_{\text{ОГК,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  в порівнянні з резервуванням каналів передачі даних для від нормованих експлуатаційних параметрів, знаходяться у межах  $0,38\div 0,98$  при експлуатаційному параметрі  $\beta=0,01$  зменшуються при підвищенні нормованого параметра  $\gamma=0,005\div 0,2$ .

На рис. 5 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ з резервуванням  $K_{\text{ОГКР,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)$  від нормованих експлуатаційних параметрів, знаходяться у межах  $0,45\div 0,99$  при експлуатаційному параметрі  $\beta=0,01$ , та зменшуються при підвищенні нормованого параметра  $\gamma=0,005\div 0,2$ . При цьому, як свідчать результати моделювання на рис. 5 потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента  $K_{\text{ОГКР,с,а,б}}^{\oplus}(\gamma\beta)=0,8\div 0,99$  при значеннях нормованого експлуатаційного параметра  $\beta=0,01$  досягається тільки при  $\gamma < 0,005$ .

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 передачі даних) типового фрагменту ВЦТМ.

Але, все ж таки цим дослідженням притаманні обмеження пов'язані з відсутністю у автора можливості проведення фізичного експерименту реєстрування справних станів в роботі типового 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 типового фрагменту ВЦТМ є рівнонадійні.

До недоліків даного дослідження можуть бути визначені відсутність дослідження урахування ієрархічності структури ВЦТМ у складі центрального, регіонального та районного вузлів, що може бути пов'язане труднощами з якими можна зіткнутися при математичного синтезу та аналізу коефіцієнта оперативної готовності одночасно для різноманітних структур резервування як вузлів, так і відповідних каналів передачі даних.

Тому, за умови подолання вказаних труднощів, коло застосування представленої методики може бути поширено для подальшого дослідження коефіцієнта оперативної готовності типових фрагментів в залежності від резервуванні вузлів в ієрархічній структурі ВЦТМ, в склад якої входять вже досліджені на коефіцієнт оперативної готовності резервовані канали передачі даних типового фрагменту ВЦТМ.

## 8. Висновки

1. Розроблена імовірнісна модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням. Підтверджена доцільність та зручність дослідження структури відомчої цифрової телекомунікаційної мережі як сукупності елементарних фрагментів, представлених у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка складається з трьох вузлів, послідовно з'єднаних відповідними каналами передачі даних. Розроблена структурна схема імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів на основі якої отримані залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування для відмов обумовленими законом Пуассона та за моделлю Колмогорова. Складені блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням каналів передачі даних з урахуванням впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності, на основі яких виведені математичні формули, яка описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ з роздільним резервуванням каналів передачі даних та застосовується для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності. Розроблена імовірнісна модель дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з роздільним резервуванням каналами передачі даних з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів в умовах реагування і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

2. Досліджено вплив структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі. Проведене статистичне математичне моделювання з дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів вузлів (каналів передачі даних) без резервування та при роздільному резервуванні каналами передачі даних у складі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яке показує, що імовірність справного стану її типового фрагменту без резервування знаходиться у межах від  $0,3 \div 0,9$ , та підвищується при резервуванні каналами передачі даних до значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі складає приблизно інтервал від  $0,4 \div 0,98$ . Потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі  $K_{огвцтм} = 0,8 - 0,99$  досягається при значеннях нормованого експлуатаційного параметра  $\beta < 0,005$ , тільки при використанні резервування каналів передачі даних. Для підтримання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної на високому рівні при технічного обслуговуванні доцільно зменшувати нормований експлуатаційний параметр  $\beta$ , тобто зменшувати співвідношення період профілактичних робіт  $T_{п}$  до часу нароби́тку на відмову  $T_{о}$ . Поставлена автором в ході дослідження допоміжна гіпотеза, що випадки резервування каналів передачі даних з кратністю  $(m_{к,са,роз} : m_{к,аб,роз} = 1:3; 3:1)$  та з комбінацією 2:2 приблизно співпадають за коефіцієнтом оперативної готовності типового фрагменту відомчої телекомунікаційної мережі, оскільки вони рівні за сумарною кратністю  $(m_{к,са,роз} + m_{к,аб,роз} = 4)$  під час проведення математичного моделювання за імовірнісною моделлю типового фрагмента відомчої теле-

комунікаційної мережі (3, 9) не підтвердилась. Насправді, як бачимо на рис. 4, 5 резервування з співвідношенням кратності моделювання  $m_{к,са,роз} : m_{к,аб,роз} = 2:2$ ; за значенням коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі суттєво більш ефективно ніж при комбінаціях 3:1; 1:3, та незначно поступає випадку коли забезпечуються резервування каналів передачі даних з комбінаціями 3:2; 2:3; 3:3.

Таким чином, для підвищення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі рекомендовано на етапі експлуатації використовувати, як мінімум, дублювання каналів передачі даних, 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/B00BVTIXUI>
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. Феценко А. Б., Загора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Problems of Emergency Situations*. 2020. Вип. № 1(31). С. 34–43. URL: <https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.3901945.svg>
11. Феценко А. Б., Загора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі  
Telecommunications and Radio Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-17

типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. Вип. № 1(33). С. 222–233. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

12. Фещенко А. Б., Загора О. В., Борисова Л. В. Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. Вип. № 1(35). С. 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

13. Фещенко А. Б., Загора О. В., Морщ Є. В. Оперативна готовність елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Вип. № 1(37). С. 44–56. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-4

*A. Feshchenko, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*

*O. Zakora, PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*

*V. Sobyna, PhD, Associate Professor, Head of Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine*

### OPERATIONAL READINESS OF A TYPICAL FRAGMENT OF THE DEPARTMENTAL DIGITAL TELECOMMUNICATION NETWORK

A probabilistic model of a typical fragment of a departmental digital telecommunications network, which takes into account the influence of the redundancy structure and operational parameters of failure and maintainability of its nodes and data transmission channels on its operational readiness ratio, was studied. A probabilistic model of the coefficient of operational readiness of a typical fragment of a digital telecommunication network after failures in an emergency situation was obtained and analyzed, and the relationship between the coefficient of operational readiness and operational parameters was established. It is indicated that the required coefficient of operational availability of a typical fragment of a digital telecommunications network is achieved not only by increasing the reliability of nodes, but also by choosing a structure of redundancy and a mode of maintenance of data transmission channels, which are not yet defined, that is why research is carried out on the dependence of the coefficient of operational readiness of a typical fragment of a departmental telecommunications network on normalized operational parameters for structures without redundancy and with redundancy of data transmission channels by the method of statistical mathematical modeling. It has been established that in order to achieve the required operational readiness ratio while reducing the requirements for the reliability of nodes of a typical fragment of a departmental digital telecommunications network, it is sufficient to apply structurally separate at least two-fold redundancy of data transmission channels, in the presence of triple redundancy of data transmission channels, the efficiency also does not increase significantly. Research data are useful for predicting the operational readiness ratio during operation and planning the required maintenance regime for nodes and data transmission channels of a typical fragment of the departmental telecommunications network, depending on the ratio of the period of preventive work to the recovery time for failure during operation.

**Keywords:** digital telecommunication network, reliability, operational availability ratio, 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 modelling 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.res.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. Available at: <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-telekomunikatsiynoi merezhi. *Problems of Emergency Situations*, 1(31), 34–43. Available at: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/31/3.pdf>

11. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L. (2021). Rozrobka imovirnisnoyi modeli tipovoho frahmenta vidomchoyi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoi 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 vidomchoi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoi merezhi DSNS. *DSNS. Problems of Emergency Situations*, 1(35), 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

13. Feshchenko, A., Zakora, O., Morshch Ye. V. Operatyvna hotovnist elementarnoho frahmentu vidomchoi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoi merezhi. *DSNS. Problems of Emergency Situations*, 1(37), 44–56. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-4

Надійшла до редколегії: 07.03.2024

Прийнята до друку: 15.04.2024