

УДК 621.395

В. О. Собина¹, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)

Ю. В. Пліско¹, н.с. сектору (ORCID 0009-0005-9526-1119)

Р. А. Черний¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-6245-0707)

С. М. Щербак¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-1133-0120)

А. Б. Феиценко², к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна,

²Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»,
Харків, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ГОТОВНОСТІ ДО ОПЕРАТИВНОЇ РОБОТИ ЛАНЦЮГА СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО УПРАВЛІННЯ

Застосований аналіз літературних даних на основі якого сформульована проблема досліджень з розробки метода для прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління з урахуванням впливу структури одночасного резервування вузлів і каналів телекомунікацій, залежно від інтенсивності відмов і відновлення, отриманих за результатами експлуатації. На основі об'єднання і розуміння зв'язків окремих вузлів і каналів телекомунікацій ланцюга оперативно-диспетчерського управління у цілісну систему синтезована відповідна імовірнісна модель, яка враховує резервування вузлів та каналів телекомунікацій і нормовані інтенсивності відмов та відновлювання апаратури вузлів і каналів телекомунікацій. Використаний метод абстрагування при виділенні суттєвої ознаки готовності до оперативної роботи та розроблені блок-схеми надійності, аналітичні вирази для імовірнісної оцінки готовності до оперативної роботи ланцюга оперативно-диспетчерського управління для різноманітних структур з роздільним резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій. Шляхом застосування метода математичного моделювання проведено прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативно-диспетчерського управління. На основі метода порівняння результатів математичного моделювання для різноманітних структур резервування виявлений стійкий закономірний вплив параметрів потоку відмов і відновлення на готовність до оперативної роботи. Встановлено, що для досягнення потрібного рівня готовності до оперативної роботи ланцюга оперативно-диспетчерського управління доцільно оптимізувати інтенсивності відмов і відновлювання та кратність резервування вузлів та каналів телекомунікацій, при цьому потрібний показник готовності досягається за рахунок застосування подвійного та трикратного роздільного резервування вузлів та каналів телекомунікацій ланцюга оперативно-диспетчерського управління.

Ключові слова: ланцюг оперативного управління, готовність до оперативної роботи, надзвичайна ситуація

1. Вступ

Організація взаємодії між складовими сектору безпеки та оборони держави при спільному виконанні завдань, як сукупність організаційно-правових, матеріально-технічних ресурсів і процесів для скоординованих дій є ключовим завданням національної безпеки, спрямованим на захист суверенітету, територіальної цілісності та інтересів країни від внутрішніх і зовнішніх загроз. В умовах гібридної агресії, пандемій та глобальних викликів ефективна взаємодія стає критичною для спільного виконання завдань, таких як оборона, контррозвідка, кібербезпека та реагування на надзвичайні ситуації (НС) техногенного, екологічного, воєнного, терористичного походження, котре забезпечує ДСНС та використовує при цьому інформаційну форму взаємодії по обміну даними про стан ліквідації наслідків НС через захищені автоматизовані цифрові платформи з використанням системи оперативно-диспетчерського управління (СОДУ) ДСНС.

Масштабні пошкодження бойовими діями об'єктів енергетичної інфраструктури супроводжуються тривалим знеструмленням електропостачання, пошкоджен-

ня каналів телекомунікацій, що потребує ремонту та відновлення апаратури ланцюга оперативного управління (СОДУ) ДСНС. Стійкість роботи апаратури ланцюга оперативного управління (СОДУ) ДСНС в даних умовах доцільно визначати готовністю до оперативної роботи, яка поєднує параметри безвідмовності й відновлюваності та визначається імовірністю події, такої, що під час раптового введення до роботи, або перезавантаження ланцюг оперативного управління (СОДУ) ДСНС виявиться у працездатному стані і надалі зможе справно працювати долаючи пікове навантаження.

Відомо, що для поліпшення готовності до оперативної роботи доцільно застосовувати методи підвищення стійкості апаратури або введення резервування, але при цьому залишається не вирішеною проблема прогнозування готовності до оперативної роботи, а саме як цей показник буде залежати від структури резервування при різноманітних варіаціях параметрів безвідмовності й відновлюваності, а головне, як одночасно обрати оптимальну структуру резервування для забезпечення потрібного рівня готовності до оперативної роботи та при цьому обрати прийнятні вимоги до експлуатаційних параметрів безвідмовності й відновлюваності.

Тому, при подолання аварійних станів в роботі ланцюга оперативного управління (СОДУ) ДСНС під час реагування та ліквідації наслідків НС в умовах воєнного стану назріває потреба в наукових дослідженнях з теоретичних питань по розробці імовірнісних моделей прогнозування готовності до оперативної роботи, які б дозволяли одночасно враховувати структуру резервування і різноманітні варіації параметрів безвідмовності й відновлюваності складових ланцюга оперативного управління та в дослідженнях з практичних питань шляхом математичного моделювання для одночасного забезпечення досягнення потрібного рівня готовності до оперативної роботи та обрання за його результатами прийнятних вимог до експлуатаційних параметрів безвідмовності й відновлюваності.

Виходячи з вищесказаного, актуальною проблемою, частина якої вирішується в статті є недосконалість прикладних методів для прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління з урахуванням впливу структури одночасного резервування вузлів і каналів телекомунікацій, залежно від інтенсивності відмов і відновлення, отриманих за результатами експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [1] представлені формалізовані методи дослідження стійкої працездатності мережі зв'язку. Надано класифікацію відмов та перелік телекомунікаційного обладнання, схильного до збоїв в умовах перевантаження. Імовірнісна модель мережі представлена у вигляді графа, де надійність вершин характеризується щільністю розподілу потоку відмов. З метою поліпшення працездатності мережі запропонований метод резервування каналів і вузлів телекомунікацій, проте готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ не аналізувалась без резервування та при наявності резервування вузлів і каналів телекомунікацій, та цей метод не яким чином не може застосовуватись до прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління.

У [2] розглядається гіпотетична телекомунікаційна мережа як імовірнісний граф, кожний елемент котрого описується імовірнісним розподілом та має обмежене значення готовності до роботи, недоліком є те, що математичний апарат для статистичних досліджень в статті не застосовувався для прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ.

У [3] розглядається проблема підвищення комплексного коефіцієнта працездатності інтелектуальних мереж, який розраховується як добуток коефіцієнта готовності, живучості та перешкодозахищеності, які заздалегідь розраховані за статистикою експлуатації. Установлено, що для підвищення комплексного коефіцієнта працездатності інтелектуальних мереж необхідно зменшувати часові витрати на технічне обслуговування. Існує недолік в тому, що імовірнісні моделі для прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ, як без резервування, так і з резервуванням вузлів і каналів телекомунікацій, не створювалися.

У [4] телекомунікаційна мережа розглядається як двополюсний випадковий граф, в якому центр і пункти телекомунікацій складають його вершини, а потім вони з'єднуються між собою ребрами та утворюють складну мережеву структуру, на основі котрої розробляються блок-схеми надійності. Але недоліком цієї роботи є те, що розроблені блок-схеми надійності та вирази до них дозволяють оцінювати лише вірогідності безвідмовної роботи без урахування інтенсивностей відновлення, тому запропонована методика не в змозі враховувати наявність резервування вузлів та каналів телекомунікацій, тобто даний метод ніяк не дозволяє прогнозувати готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ.

У [5] здійснювалась мінімізація часу простою пропущених дійсних викликів телекомунікаційної мережі для підвищення доступності звертання заявників до центру екстреного виклику. Недолік роботи в тому що водночас прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ зовсім не проводилися.

У [6] наведено оглядовий аналіз методів моделювання надійності телекомунікаційних мереж на основі діаграм, блоків надійності, дерев відмов і ланцюгів Маркова. Проте недоліком даної роботи слід вважати те, що в ній моделювання впливу показників безвідмовності та відновлення вузлів та каналів телекомунікацій на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ не проводились.

У [7, 8] використовуються методи моделювання та аналізу стійкості програмного забезпечення СОДУ, а також рекомендації щодо відновлення працездатності його після пошкодження і знеструмлення. Недолік роботи в тому, що структури резервування вузлів і каналів телекомунікацій не розроблялись та моделювання впливу показників безвідмовності і відновлення на готовність до оперативної роботи ланцюга управління СОДУ не здійснювалося.

У [9] досліджувалась стійкість роботи елементарних сегментів стохастичної телекомунікаційної мережі графоаналітичним методом, недолік якого в неможливості прогнозувати готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ як без резервування так і з резервуванням вузлів і каналів телекомунікацій під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

У [10] складено імовірнісну модель ланцюга оперативного управління СОДУ, яка визначає залежність готовності до оперативної роботи від інтенсивностей відмов та відновлювання для блок-схем надійності без резервування та з резервуванням каналів телекомунікацій. Однак недолік цієї моделі полягає в не врахуванні впливу резервування вузлів ланцюга оперативного управління СОДУ на прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління з урахуванням впливу структури одночасного резервування вузлів і каналів телекомунікацій, залежно від інтенсивності відмов і відновлення, отриманих за результатами експлуатації.

З огляду на це, для запобігання аварійним станам у роботі ланцюга оперативного управління системи оперативно-диспетчерського управління зростає потреба в розробці достовірних методів оцінки готовності до оперативної роботи в умовах реагування та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Це підкреслює актуальність досліджуваної проблеми, яка зумовлена обмеженою досконалістю наявних імовірнісних моделей для оцінки готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління мережі. Ці моделі не повною мірою враховують вплив структури резервування вузлів і каналів телекомунікацій, а також експлуатаційні параметри, такі як інтенсивність відмов і відновлення, отримані на основі експлуатаційних даних по інтенсивностям відмов та відновлення вузлів і каналів телекомунікацій, на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ за умов відсутності або наявності резервування.

Таким чином, залишається невирішеною частина проблеми недосконалості прикладних методів для прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління з урахуванням впливу структури одночасного резервування вузлів і каналів телекомунікацій, залежно від інтенсивності відмов і відновлення, отриманих за результатами експлуатації.

3. Мета та завдання дослідження

Мета даної роботи полягає у розробці метода прогнозування готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління системи оперативно-диспетчерського управління, з урахуванням впливу структури одночасного резервування вузлів і каналів телекомунікацій, залежно від інтенсивності відмов і відновлення, отриманих за результатами експлуатації.

Для досягнення мети роботи потрібно і вирішити наступні завдання:

- розробити імовірнісну модель ланцюга оперативного управління системи оперативно-диспетчерського управління з резервуванням вузлів і каналів телекомунікацій;
- виявити вплив структури резервування вузлів і каналів телекомунікацій на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління системи оперативно-диспетчерського управління в залежності від параметрів безвідмовності і ремонтпридатності.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є організація експлуатації вузлів і каналів телекомунікацій СОДУ та запобігання аварійним станам під час ліквідації наслідків НС в умовах воєнного стану.

Предметом дослідження є готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ.

Гіпотеза дослідження ґрунтується на припущенні про існування статистичної залежності готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ від параметрів потоку відмов та відновлення і структур резервування вузлів та каналів телекомунікацій із різною кратністю резервування.

Під час наукових досліджень застосовані наступні теоретичні методи дослідження:

аналіз для розкладання об'єкта дослідження на складові для детального вивчення;

синтез для об'єднання окремих вузлів і каналів телекомунікацій ланцюги

оперативного управління у цілісну систему СОДУ для розуміння зв'язків;

абстрагування для виділення суттєвої ознаки готовності до оперативної роботи, ігноруючи другорядні показники;

моделювання для створення імовірнісної математичної моделі ланцюга оперативного управління СОДУ для вивчення впливу структури резервування та параметрів безвідмовності і відновлюваності його вузлів і каналів телекомунікацій на його готовність до оперативної роботи;

порівняння результатів математичного моделювання для зіставлення структур резервування ланцюга оперативного управління СОДУ з потрібною готовністю до оперативної роботи для виявлення прийнятних вимог до експлуатаційних параметрів безвідмовності і відновлюваності вузлів і каналів телекомунікацій.

При розробці імовірнісної моделі ланцюга оперативного управління СОДУ враховується, що потоки відмов вузлів і каналів телекомунікацій є найпростішими та описуються за моделлю Колмогорова.

Під час математичного моделювання готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління мережі застосовуються спрощення, за яких вузли та канали телекомунікацій вважаються рівнонадійними. Аналітичні дослідження базуються на методах теорії надійності, тоді як для теоретичних досліджень використовувались методи статистичного моделювання.

Під час математичного моделювання використовувались ліцензійні програмні засоби: 64-розрядна операційна система Windows 10 Pro версія 22H2, збірка ОС19045.6456, обчислювальна платформа математичних розрахунків MathCad 14 та апаратні засоби персонального комп'ютера: процесор Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8600 @ 3.33GHz, оперативна пам'ять 4 ГБ, пам'ять 466 GB HDD ST500DM002-1BD142, 119 GB SSD SSDPR-CX400-128.

Умови математичного моделювання відповідають реальним умовам експлуатації ланцюга оперативного управління СОДУ, а результати розрахунків надаються у графічному вигляді.

5. Розробка імовірнісної моделі ланцюга оперативного управління з резервуванням

Апаратура ланцюга оперативного управління СОДУ забезпечує обмін інформацією між посадовими особами відповідних пунктів управління – вузлів (с, а, b) через канали телекомунікацій (са, ab). Блок-схема імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування з урахуванням нормованих інтенсивності відмов та відновлення її вузлів та каналів телекомунікацій представлена на рис. 1 а), де кратності резервування вузлів та каналів телекомунікацій дорівнюють одиниці $m_{в,с,роз} = m_{в,а,роз} = m_{в,а,роз} = 1$, $m_{к,са,роз} = m_{к,ab,роз} = 1$.

На рис. 1, а) кожному елементу схеми відповідають певні коефіцієнти оперативної готовності $K_{ог, с}(\gamma, \beta)$ – центрального вузла, $K_{ог, а}(\gamma, \beta)$ – вузла 1-го рівня (регіонального рівня), $K_{ог, б}(\gamma, \beta)$ – вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів телекомунікацій $K_{ог, с,а}(\gamma, \beta)$ і $K_{ог, а,б}(\gamma, \beta)$.

Виходячи зі структури ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування рис. 1, а, при обліку надійності вершин с, а і b готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{ог, с,а}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ виявляється за наступною формулою [10]:

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

де $K_{\text{ОГ},c}(\gamma, \beta)$, $K_{\text{ОГ},a}(\gamma, \beta)$, $K_{\text{ОГ},b}(\gamma, \beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності вузлів с, а, б ланцюга оперативного управління СОДУ; $K_{\text{ОГ},c,a}(\gamma, \beta)$, $K_{\text{ОГ},a,b}(\gamma, \beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності каналів телекомунікацій ланцюга оперативного управління СОДУ.

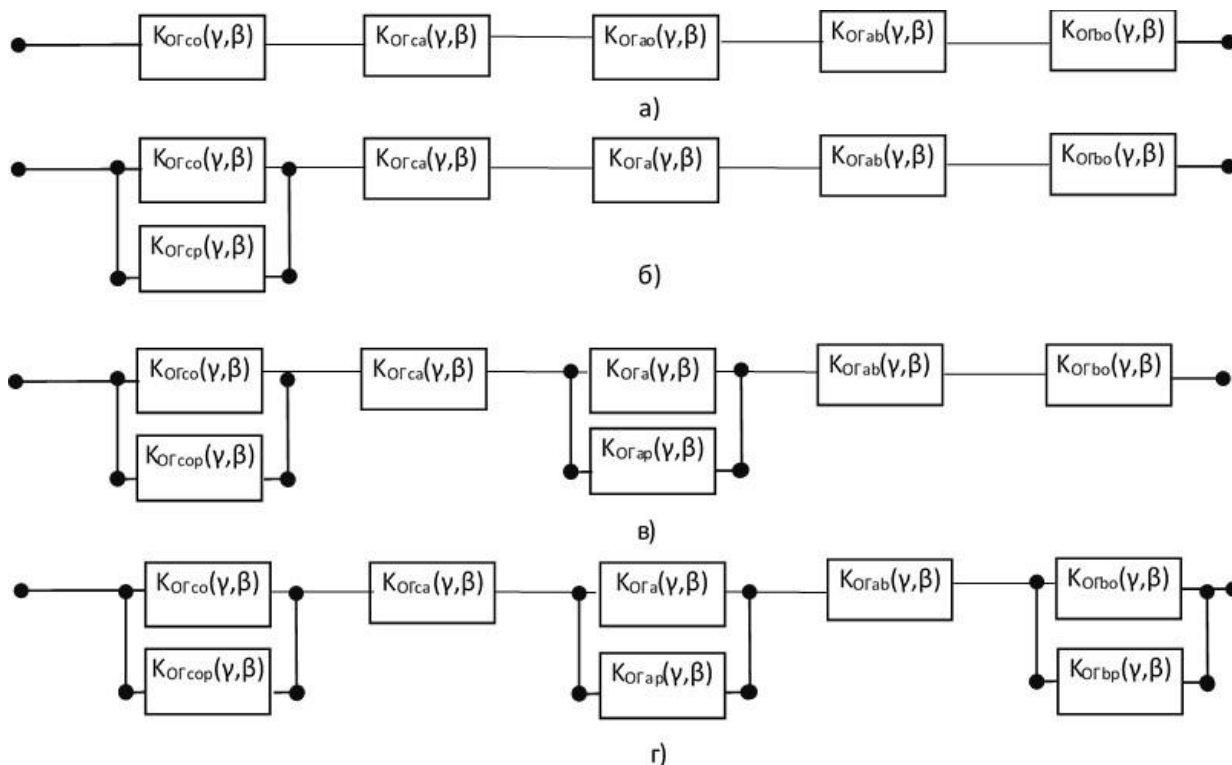


Рис. 1. Блок-схема імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ для структури без резервування та з резервуванням вузлів: а – $m_{вс,роз} = m_{ва,роз} = m_{вб,роз} = 1$, $m_{кса,роз} = m_{kab,роз} = 1$; б – $m_{вс,роз} = 2$, $m_{ва,роз} = m_{вб,роз} = 1$, $m_{кса,роз} = m_{kab,роз} = 1$; в – $m_{вс,роз} = m_{ва,роз} = 2$, $m_{вб,роз} = 1$, $m_{кса,роз} = m_{kab,роз} = 1$; г – $m_{вс,роз} = m_{ва,роз} = m_{вб,роз} = 2$, $m_{кса,роз} = m_{kab,роз} = 1$

Як відомо вираз для готовності до оперативної роботи $K_{\text{ОГ}}(\gamma, \beta)$ апаратури вузла (каналу телекомунікацій) ланцюга оперативного управління СОДУ в умовах відновлення і перезавантаження за відмовами, обумовленими моделлю Колмогорова, визначається у наступному виді [10]:

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

де $\gamma = \lambda / \mu = T_{\text{в}} / T_{\text{о}}$ – співвідношення інтенсивності відмов до інтенсивності відновлення, саме як середнього часу відновлення $T_{\text{в}}$ елемента ланцюга оперативного управління СОДУ, що відмовив, до часу роботи до першої відмови $T_{\text{о}}$; $\beta = \lambda t = T_{\text{п}} / T_{\text{о}}$ – співвідношення типового періоду експлуатації $t = T_{\text{п}}$ (періоду ре-

гламентних робіт, часу вимушеного простою апаратури вузла або каналу телекомунікацій ланцюга оперативного управління СОДУ через відсутність необхідних елементів заміни до часу наробітку на відмови T_0).

Як, що вважати вузли та канали телекомунікацій рівно надійними, то це враховується формулою (3):

$$K_{OG,c}(\gamma, \beta) = K_{OG,c,a}(\gamma, \beta) = K_{OG,a}(\gamma, \beta) = K_{OG,a,b}(\gamma, \beta) = K_{OG,b}(\gamma, \beta) = K_{OGK}(\gamma, \beta). \quad (3)$$

Тоді готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{OGK,c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ без резервування за відмовами, які описуються моделлю Колмогорова (3), дорівнює [10]:

$$K_{OGK,c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta) = [K_{OGK}(\gamma, \beta)]^5 = \left\{ \frac{\left\{ 1 + \gamma \cdot \exp \left[-\frac{(\gamma+1)}{\gamma} \beta \right] \right\}}{(1+\gamma)^2 \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(1+\gamma)} \right]} \right\}^5. \quad (4)$$

Структурні схеми імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з роздільним резервуванням вузлів наведені на рис. 1, де:

варіант 1 б) – відповідає структурі з роздільним резервуванням тільки центрального вузла дублюванням з відповідними кратностями резервування $m_{в,с,роз}=2$, , при цьому вузол 1-го рівня (регіонального рівня) вузол 2-го рівня (районного рівня), та відповідні канали телекомунікацій не резервовані, тобто їх кратності резервування дорівнюють одиниці $m_{в,а,роз}=m_{в,б,роз}=1$, $m_{к,са,роз}=m_{к,аб,роз}=1$;

варіант 1 в) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла та вузла 1-го рівня (регіонального рівня) дублюванням з відповідними кратностями резервування $m_{в,с,роз}=m_{в,а,роз}=2$, , при цьому вузол 2-го рівня (районного рівня) та відповідні канали телекомунікацій не резервовані, тобто їх кратності резервування дорівнюють одиниці $m_{в,б,роз}=1$, $m_{к,са,роз}=m_{к,аб,роз}=1$;

варіант 1 г) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла, 1-го рівня (регіонального рівня) і вузла 2-го рівня (районного рівня) дублюванням, що відповідає кратностями резервування $m_{в,с,роз}=m_{в,а,роз}=m_{в,б,роз}=2$, при цьому відповідні канали телекомунікацій не резервовані, тобто їх кратності резервування дорівнюють одиниці $m_{к,са,роз}=m_{к,аб,роз}=1$.

Готовність до оперативної роботи вузла фрагмента СОДУ з роздільним резервуванням обчислюється за формулою:

$$K_{OGK_{в,с,роз}}(\gamma, \beta) = K_{OGK_{в,а,роз}}(\gamma, \beta) = K_{OGK_{в,б,роз}}(\gamma, \beta) = \left[1 - (1 - K_{OGK}(\gamma, \beta))^{m_{в,роз}} \right]. \quad (5)$$

При роздільному резервуванні вузла ланцюга оперативного управління СОДУ дублюванням $m_{в,роз} = 2$ його готовність до оперативної роботи складатиме:

$$K_{OGK_{в,с,а,б,роз}}(\gamma, \beta) = \left[1 - (1 - K_{OGK}(\gamma, \beta))^2 \right]. \quad (6)$$

тивного управління СОДУ без резервування та з резервуванням вузлів рис. 1 з урахуванням (4–6) буде представлена наступними формулами (7)

$$K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma,\beta) = \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{ОГ}}(\gamma,\beta)^5 \text{ при } m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{вб},\text{роз}} = m_{\text{ва},\text{роз}} = 1, m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}} = 1; \\ K_{\text{ОГ}}(\gamma,\beta)^4 \cdot [1 - (1 - K_{\text{ОГ}_0}(\gamma,\beta))^2] \\ \text{при } m_{\text{вс},\text{роз}} = 2, m_{\text{вб},\text{роз}} = m_{\text{ва},\text{роз}} = 1, m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}} = 1; \\ K_{\text{ОГ}}(\gamma,\beta)^3 \cdot [1 - (1 - K_{\text{ОГ}_0}(\gamma,\beta))^2]^2 \\ \text{при } m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{вб},\text{роз}} = 2, m_{\text{ва},\text{роз}} = 1, m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}} = 1; \\ K_{\text{ОГ}}(\gamma,\beta)^2 \cdot [1 - (1 - K_{\text{ОГ}_0}(\gamma,\beta))^2]^3 \\ \text{при } m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{вб},\text{роз}} = m_{\text{ва},\text{роз}} = 2, m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}} = 1. \end{array} \right\}. (7)$$

При передачі інформації в ланцюзі оперативного управління СОДУ одночасне використання каналів телекомунікацій ДСНС, комерційних операторів телекомунікацій та ресурсів державних каналів телекомунікацій спеціального призначення еквівалентно роздільному резервуванню з кратністю $m_{\text{к},\text{роз}}=2, 3$, тоді готовність до оперативної роботи каналів телекомунікацій з резервуванням визначається формулами (8, 9):

$$K_{\text{ОГК},c,a}(\gamma,\beta) = K_{\text{ОГК},a,b}(\gamma,\beta) = [1 - (1 - K_{\text{ОГК}}(\gamma,\beta))^{m_{\text{к},\text{роз}}}], (8)$$

$$K_{\text{ОГК},c,a}(\gamma,\beta) = K_{\text{ОГК},a,b}(\gamma,\beta) = \left\{ \begin{array}{l} [K_{\text{ОГ}} K(\gamma,\beta)] \text{ при } m_{\text{к},\text{роз}} = 1; \\ [1 - (1 - K_{\text{ОГК}}(\gamma,\beta))^2] \text{ при } m_{\text{к},\text{роз}} = 2 \\ [1 - (1 - K_{\text{ОГ}} K(\gamma,\beta))^3] \text{ при } m_{\text{к},\text{роз}} = 3. \end{array} \right\}. (9)$$

Блок-схема моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ представлена на рис. 2.

На рис. 2, представлені можливі структури резервування, які вважаються найбільш близькими до реальних умов використання типових фрагментів СОДУ:

варіант (рис. 2, а) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла, відповідних каналів телекомунікацій дублюванням з відповідними кратностями резервування $m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}}=2$, при цьому вузол 1-го рівня (регіонального рівня) вузол 2-го рівня (районного рівня), не резервовані, тобто їх кратності резервування дорівнюють одиниці $m_{\text{ва},\text{роз}} = m_{\text{вб},\text{роз}}=1$;

варіант (рис. 2, б) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла, вузла 1-го рівня (регіонального рівня), відповідних каналів телекомунікацій дублюванням з відповідними кратностями резервування $m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{ва},\text{роз}} = m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}}=2$, , при цьому вузол 2-го рівня (районного рівня), тобто його кратність резервування дорівнює одиниці $m_{\text{вб},\text{роз}}=1$;

варіант (рис. 2, в) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла, вузла 1-го рівня (регіонального рівня), вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів телекомунікацій дублюванням, що відповідає кратностям резервування $m_{\text{вс},\text{роз}} = m_{\text{ва},\text{роз}} = m_{\text{вб},\text{роз}} = m_{\text{кса},\text{роз}} = m_{\text{каб},\text{роз}}=2$;

варіант (рис. 2, г) – відповідає структурі з роздільним резервуванням центрального вузла, вузла 1-го рівня (регіонального рівня), вузла 2-го рівня (районного рівня) дублюванням, що відповідає кратністям резервування $m_{вс,роз} = m_{ва,роз} = m_{вв,роз} = 2$; та відповідних каналів телекомунікацій з кратністю резервування $m_{кса,роз} = m_{каб,роз} = 3$.

Імовірнісна модель оцінки готовності до оперативної роботи фрагменту СОДУ з роздільним резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій рис. 2 з урахуванням (8, 9) буде представлена наступними формулами:

$$K_{ОГ,с,а,в}^{\oplus}(\gamma, \beta) = \left\{ \begin{array}{l} K_{ОГ}(\gamma, \beta)^2 \cdot [1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma, \beta))^2]^3, \\ \text{при } m_{вс,роз} = 2, m_{вв,роз} = m_{ва,роз} = 1, m_{кса,роз} = m_{каб,роз} = 2; \\ K_{ОГ}(\gamma, \beta)^1 \cdot [1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma, \beta))^2]^4, \\ \text{при } m_{вс,роз} = m_{вв,роз} = 2, m_{ва,роз} = 1, m_{кса,роз} = m_{каб,роз} = 2; \\ [1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma, \beta))^2]^5, \\ \text{при } m_{вс,роз} = m_{вв,роз} = m_{ва,роз} = 2, m_{кса,роз} = m_{каб,роз} = 2; \\ [1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma, \beta))^2]^3 \cdot [1 - (1 - K_{ОГ_0}(\gamma, \beta))^3]^2, \\ \text{при } m_{вс,роз} = m_{вв,роз} = m_{ва,роз} = 2, m_{кса,роз} = m_{каб,роз} = 3. \end{array} \right\}, (10)$$

де $K_{ОГ_0}(\gamma, \beta) = K_{ОГК}(\gamma, \beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності вузла або каналу телекомунікацій ланцюга оперативного управління СОДУ за відмовами за моделлю Колмогорова (4).

Отримані формули (4, 7, 10) описують імовірнісну модель ланцюга оперативного управління СОДУ (рис. 1, 2) та дозволяють провести математичне моделювання з дослідження впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання та структури резервування вузлів та каналів телекомунікацій на його готовність до оперативної роботи.

6. Дослідження готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного диспетчерського управління

На першому етапі проведено математичне моделювання залежності готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування, та з резервуванням тільки вузлів телекомунікацій від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання за допомогою обраної імовірнісної моделі ланцюга оперативного управління СОДУ (рис. 1) формули (2, 4, 7). Результати представлені на рис. 3.

На другому етапі проведено математичне моделювання залежності готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з резервуванням вузлів і каналів телекомунікацій від нормованих параметрів безвідмовності і ремонтпридатності за допомогою обраної імовірнісної моделі ланцюга оперативного управління СОДУ (рис. 1, 2) формули (4, 10). Результати представлені на рис. 4.

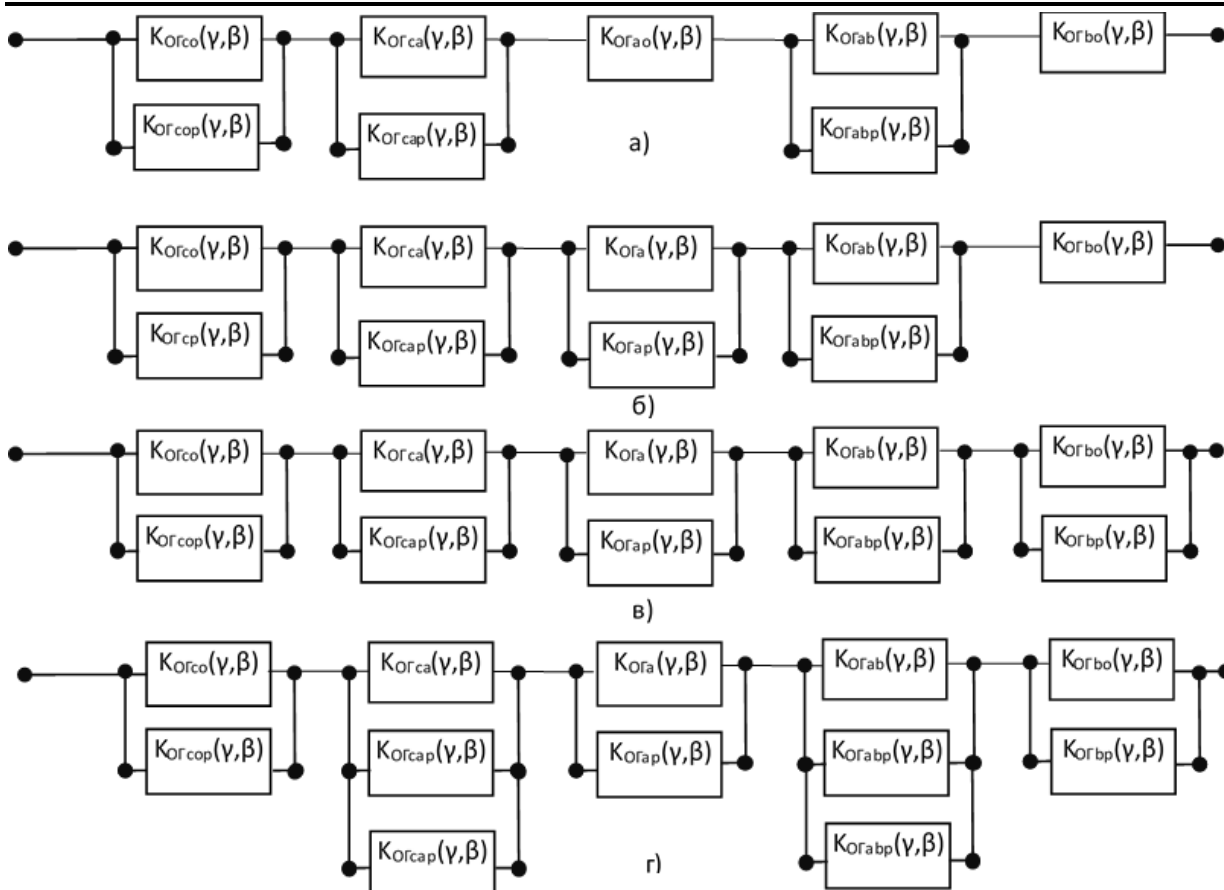


Рис. 2. Блок-схема імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ для структури з резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій: а – $m_{вс,роз}=2$, $m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=1$, $m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=2$; б – $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=2$, $m_{вb,роз}=1$, $m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=2$; в – $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=2$, $m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=2$; г – $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=2$, $m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=3$

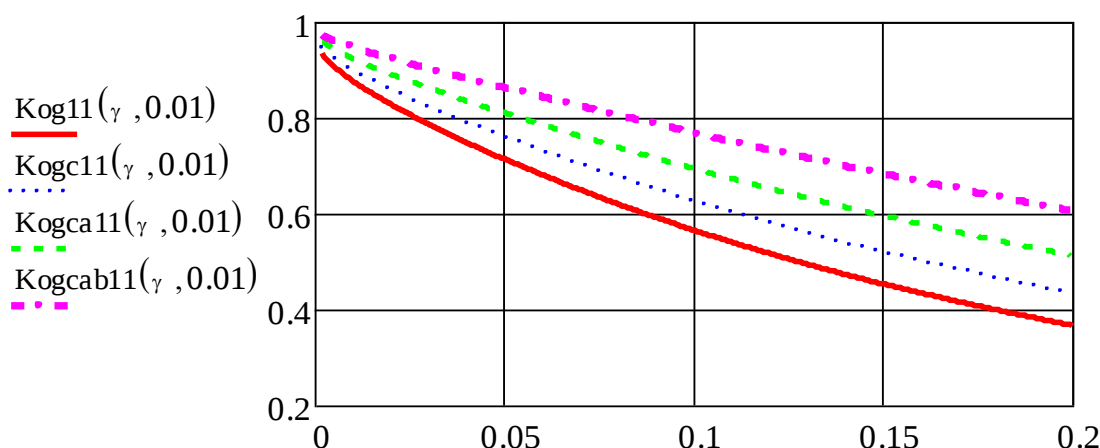


Рис. 3. Залежності готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання без резервування та з резервуванням тільки вузлів: $K_{OG11}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=1$; з резервуванням вузлів: $K_{OGc11}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{вс,роз}=2$, $m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=1$; $K_{OGca11}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=2$, $m_{вb,роз}=m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=1$; $K_{OGcab11}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{вс,роз}=m_{ва,роз}=m_{вb,роз}=2$, $m_{кса,роз}=m_{каb,роз}=1$

На рис. 3 по осі ординат ліворуч відкладені розрахункові значення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{OGK,c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$

для значення нормованої інтенсивності відновлювання $\beta=0,01$; нормована інтенсивність відмов γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень $\gamma=0,005 \div 0,2$.

На рис. 3 значення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{og11}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogc11}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogca11}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogcab11}(\gamma, \beta=0,01)$ мають спадаючу форму експоненти в залежності від γ по осі абсцис, тобто зменшуються при підвищенні нормованої інтенсивності відмов γ . Значення функцій K_{og} , наприклад при $\gamma=0,1$ знаходяться у межах $0,55 \div 0,75$, та розподілені за величиною між собою за співвідношенням $K_{og11}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogc11}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogca11}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogcab11}(\gamma, \beta=0,01)$.

На рис. 3 за результатами моделювання потрібний рівень готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{ogkp,c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta) = 0,8 \div 0,99$ при значеннях нормованої інтенсивності відновлення $\beta=0,01$ досягається тільки при $\gamma < 0,025$.

На рис. 4 по осі ординат відкладені розрахункові значення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій $K_{ogk,c,a,b}^{\oplus}(\gamma, \beta)$ для значення нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,01$, та при резервуванні каналів телекомунікацій, параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень $\gamma=0,005 \div 0,2$.

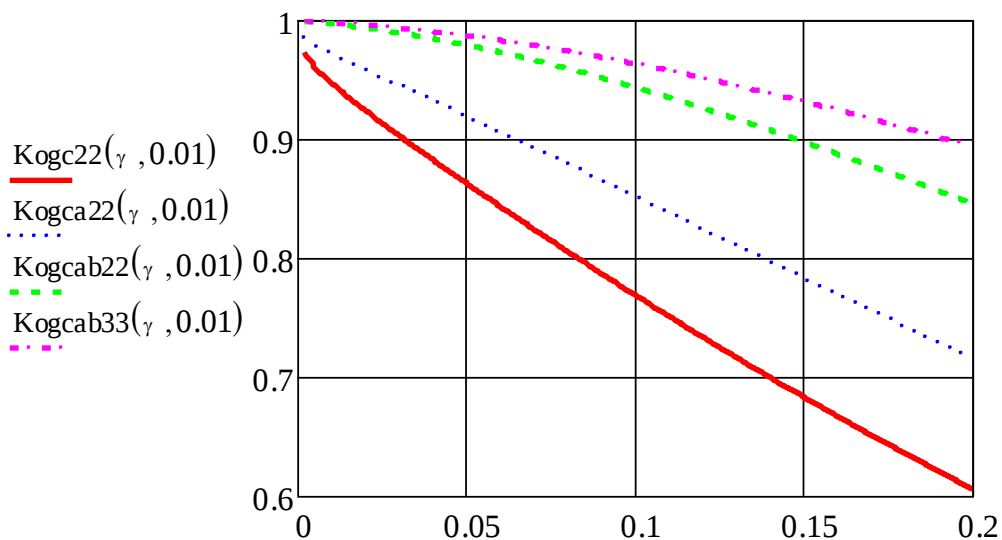


Рис. 4. Залежності готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління ОДУ від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання з резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій: $K_{ogc22}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{взс,роз}=2$, $m_{вза,роз}=m_{взб,роз}=1$, $m_{кзса,роз}=m_{кзab,роз}=2$; $K_{ogca22}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{взс,роз}=m_{вза,роз}=2$, $m_{взб,роз}=1$, $m_{кзса,роз}=m_{кзab,роз}=2$; $K_{ogcab22}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{взс,роз}=m_{вза,роз}=m_{взб,роз}=2$, $m_{кзса,роз}=m_{кзab,роз}=2$; $K_{ogcab33}(\gamma, \beta=0,01)$ при $m_{взс,роз}=m_{вза,роз}=m_{взб,роз}=2$, $m_{кзса,роз}=m_{кзab,роз}=3$

На рис. 4 значення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{ogc22}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogca22}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogcab22}(\gamma, \beta=0,01)$, $K_{ogcab33}(\gamma, \beta=0,01)$ мають спадаючу форму експоненти в залежності від ординати γ , тобто зменшуються при підвищенні нормованого параметра γ . Значення функцій, наприклад при $\gamma=0,1$ знаходяться у межах $0,75 \div 0,97$, та розподілені за величиною між собою за співвідношенням $K_{ogc22}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogca22}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogcab22}(\gamma, \beta=0,01) < K_{ogcab33}(\gamma, \beta=0,01)$.

Значення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ представлені на рис. 4, на величину приблизно 0,2 вище ніж на рис. 3.

7. Обговорення результатів математичного моделювання готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління

Отримані результати пояснюються аналізом літературних даних в розділі 2, 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 готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ. Проведення досліджень, для вирішення мети роботи розподілені на два етапи: обрання структурної схеми та імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування та з роздільним резервуванням вузлів телекомунікацій в залежності від експлуатаційних параметрів; математичне моделювання готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ в залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та експлуатаційних параметрів; аналітичне порівняння результатів математичного моделювання готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування, в залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання.

На першому етапі досліджень в роботі спочатку при урахуванні коефіцієнтів оперативної готовності вузлів (каналів телекомунікацій) була розроблена структурна схема імовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування в залежності від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання (рис. 1, а). На основі розробленої блок-схеми надійності (рис. 1, а) виведена математична формула (4), яка описує імовірнісну модель ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування.

Надалі на другому етапі була розроблена блок-схеми надійності ланцюга оперативного управління СОДУ з резервуванням вузлів (рис. 2, б, в, г) з урахуванням впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи. На основі розробленої блок-схеми надійності (рис. 2, б, в, г) виведена математична формула (7), яка описує імовірнісну модель ланцюга оперативного управління СОДУ з роздільним резервуванням вузлів телекомунікацій та застосовується для математичного моделювання впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи $K_{\text{ОГ},c,a,b}^{\oplus}(\gamma,\beta)$.

На першому етапі на рис. 3 наведені результати математичного моделювання впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування та з резервуванням вузлів (2, 4, 7).

На другому етапі на рис. 4 наведені порівняльні результати математичного моделювання впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{\text{ОГК},c,a,b}^{\oplus}(\gamma,\beta)$ з сумісним резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій.

На рис. 4 за результатами моделювання потрібний рівень готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ $K_{\text{ОГКР},c,a,b}^{\oplus}(\gamma,\beta) = 0,8 \div 0,99$ при значеннях нормованого експлуатаційного параметра $\beta=0,01$ досяга-

ється тільки при $\gamma < 0,05$.

Позитивною особливістю отриманих результатів дослідження є використання зручної та наочної форми опису готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з використанням блок-схем надійності, який враховує нормовані інтенсивності відмов та відновлювання вузлів та каналів телекомунікацій ланцюга оперативного управління СОДУ.

Автори обмежені в можливості провести фізичний експеримент для фіксації готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ під час увімкнення, перезавантаження чи зміни структури резервування. Через це і було застосовано метод математично-статистичного моделювання зі спрощеним припущенням про однакову надійність та відповідно готовність до оперативної роботи усіх вузлів і каналів телекомунікацій ланцюга оперативного управління СОДУ.

До недоліків дослідження можна віднести відсутність аналізу впливу ієрархічності структури ланцюга оперативного управління СОДУ на переваги у резервуванні вузлів і каналів телекомунікацій, все ж інтуїтивно можна вважати, що за ієрархічністю більш зарезервованим будуть обрані структури з резервуванням центрального вузла та вузла 1-го рівня (регіонального рівня) з відповідним каналом телекомунікацій, наприклад, рис. 2, б).

При подоланні зазначених недоліків і труднощів, запропонована імовірнісна модель готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ може бути застосована для удосконалення структури резервування вузлів та каналів телекомунікацій.

8. Висновки

1. Створено імовірнісну модель готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій вигляді блок-схеми надійності з трьох послідовно з'єднаних вузлів і відповідних каналів телекомунікацій нормованих в залежності від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання .

Розроблено структурну схему ймовірнісної моделі готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з урахуванням резервування вузлів залежно від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання. На її основі отримано залежності готовності до оперативної роботи для ланцюга оперативного управління СОДУ із резервуванням. Складено також блок-схеми надійності ланцюга оперативного управління СОДУ з резервування вузлів і каналів телекомунікацій з урахуванням впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на його готовність до оперативної. За допомогою цих схем виведені математичні формули, які описують ймовірнісну модель готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ із роздільним резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій. Ця модель застосовується для математичного моделювання впливу нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ з резервуванням резервуванням вузлів та каналів телекомунікацій під час реагування та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в умовах воєнного стану.

2. Досліджено вплив структури резервування вузлів і каналів телекомунікацій, а також нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання на готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ. Проведено статистичне математичне моделювання, яке показало залежність готовності до опера-

ративної роботи від нормованих інтенсивностей відмов та відновлювання вузлів і каналів телекомунікацій без резервування та з роздільним резервуванням. З'ясовано, що готовність до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ без резервування каналів телекомунікацій становить від 0,4 до 0,98, а при сумісному резервуванні вузлів і каналів телекомунікацій підвищується до діапазону 0,6–0,99.

Необхідний рівень готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ (0,8–0,99) досягається за нормованою інтенсивністю відмов $\gamma < 0,05$ лише при одночасному резервуванні вузлів і каналів телекомунікацій. Для підтримання високого рівня готовності до оперативної роботи під час технічного обслуговування рекомендується зменшувати нормовану інтенсивність відновлювання – параметр β , який дорівнює співвідношенню періоду профілактичних або регламентних робіт ($T_{\text{п}}$) до часу наробітку на відмову ($T_{\text{о}}$), тобто треба підтримувати високу наробітку на відмову та по можливості частіше проводити профілактичні або регламентні роботи на апаратурі вузлів та каналів телекомунікацій.

Для підвищення готовності до оперативної роботи ланцюга оперативного управління СОДУ доцільно застосовувати двократне, або трикратне одночасне роздільне резервування вузлів та каналів телекомунікацій.

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. Lima M. A. de Q. V., Maciel P. R. M., Silva B., Guimarães A. P. Performance 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., Собина В. О. Оперативна готовність типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. Вип. № 1(39). P. 237–251. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-17

V. Sobyna¹, PhD, Associate Professor, Head of the Department

Y. Plisko¹, Researcher Associate of the Sector

R. Chernysh¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

S. Shcherbak¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

A. Feshchenko², PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine,

²National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

INCREASING THE READINESS FOR OPERATIONAL WORK OF THE OPERATIONAL CONTROL CHAIN

An analysis of the literature data was applied, on the basis of which the research problem of developing a method for predicting the readiness for operational operation of the operational control chain was formulated, taking into account the influence of the structure of simultaneous redundancy of nodes and telecommunications channels, depending on the intensity of failures and restoration obtained from the operation results. Based on the unification and understanding of the connections of individual nodes and telecommunications channels of the operational control chain into a holistic system, an appropriate probabilistic model was synthesized, which takes into account the redundancy of nodes and telecommunications channels and the normalized intensities of failures and restoration of the equipment of nodes and telecommunications channels. The abstraction method was used to highlight a significant sign of readiness for operational operation, and reliability flowcharts and analytical expressions were developed for the probabilistic assessment of the readiness for operational operation of the operational control chain for various structures with separate redundancy of nodes and telecommunications channels. By applying the method of mathematical modeling, the readiness for operational operation of the operational control chain was predicted. Based on the method of comparing the results of mathematical modeling for various redundancy structures, a stable, regular influence of the failure and recovery flow parameters on the readiness for operational work has been revealed. It has been established that to achieve the required level of readiness for operational work of the operational dispatch control chain, it is advisable to optimize the failure and recovery intensities and the multiplicity of redundancy of nodes and telecommunications channels, while the required readiness indicator is achieved by using double and triple separate redundancy of nodes and telecommunications channels of the operational dispatch control chain.

Keywords: operational control chain, instant readiness for operational work, 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 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 & Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-21

System Safety, 132, 97–106. doi: 10.1016/j.res.2014.07.012

5. Lima, M. A. de Q. V., Maciel, P. R. M., Silva, B., Guimarães, A. P. (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. Feschenko, A. B., Zakora, O. V., Sobina, V. O. (2024). Operativna gotovnist tipovogo fragmentu vidomchoyi tsifrovoyi telekomunikatsiynoyi merezhi. DSNS. Problems of Emergency Situations, 1(39), 237–251. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-17

Надійшла до редколегії: 10.09.2025

Прийнята до друку: 12.10.2025