

## МОДЕЛІ БЕЗВІДМОВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ

*Проведено аналіз функціональних схем телекомунікаційного обладнання та відповідних їм схем надійності при різних способах структурного резервування. Запропонована методика побудови моделей безвідмовності телекомунікаційного обладнання мереж зв'язку.*

*Кононова И.В. Модели безотказности телекоммуникационного оборудования сетей связи при различных способах структурного резервирования. Проведен анализ функциональных схем телекоммуникационного оборудования та соответствующих им схем надежности при различных способах структурного резервирования. Предложена методика построения моделей безотказности телекоммуникационного оборудования сетей связи.*

*I. Kononova Models of failure-free operation of telecommunication equipment of communication networks under various methods of structural redundancy. The paper is devoted to analysis of telecommunications equipment functional diagrams and their corresponding reliability schemes for various methods of structural redundancy. A technique for constructing models for the reliability of communication networks telecommunications equipment is proposed.*

**Ключові слова:** надійність, структурне резервування, безвідмовність.

### Постановка завдання у загальному вигляді.

Первинна мережа стаціонарної компоненти системи зв'язку та АУВ Збройних Сил України на 90 % базується на орендованих лініях зв'язку ВАТ „Укртелеком”.

Основними технологіями побудови транспортної (магістральною) мережі ВАТ „Укртелеком” є технологія синхронної цифрової ієрархії (*SDH, Synchronous Digital Hierarchy*) і системи передачі на основі спектрального розподілу (*WDM, Wavelength Division Multiplexing*). Здійснюючи передачу трафіка на високих швидкостях, сучасні магістральні мережі стають уразливими навіть перед мінімальними та короткочасними перервами зв'язку. Тому існує потреба у своєчасній розробці та впровадженні заходів щодо підвищення надійності існуючих і перспективних мереж зв'язку загального призначення та мереж військового зв'язку.

**Аналіз публікацій в даній предметній області.** На даний час досить добре вивчені окремі методи резервування (зокрема, структурне, часове, інформаційне) [1 – 7]. Однак, відносно мало отримано наукових результатів, які дозволяють проводити аналіз складних функціональних схем телекомунікаційного обладнання та відповідних їм схем надійності при різних способах структурного резервування. У [8 – 12] послідовно викладено основні аспекти побудови та використання волоконно-оптичних систем передачі *SDH* та різних видів хвильового мультиплексування, але питання забезпечення надійності таких систем не розглянуто.

**Метою статті** є аналіз функціональних схем телекомунікаційного обладнання та відповідних їм схем надійності при різних способах структурного резервування, а також розробка моделей безвідмовності телекомунікаційного обладнання за допомогою запропонованої методики.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо варіанти забезпечення надійності магістральної мережі зв'язку на прикладі транспортних систем передачі *SDH*. Характерною особливістю транспортних систем передачі *SDH* є високий рівень структурного резервування як лінійних трактів, так і основних вузлів мультиплексорного обладнання.

У загальному випадку всі механізми забезпечення надійності мережі зв'язку поділяються на два самостійних (хоча і мають деякі загальні ознаки) класи: захисне перемикання (або резервування) і відновлення (або перемаршрутизація) [2].

Аварійні ситуації в лінійній частині магістральної мережі у більшості випадків виникають через механічні пошкодження (обриви) оптичного волокна, тому очевидним

рішенням цієї проблеми є збільшення кількості доступних фізичних трактів передачі, на які буде здійснюватися перемикання при виникненні несправності. Технічно це досягається нарощенням числа світловодів понад мінімально необхідного значення (лінійне резервування). В найпростішому випадку резервні волокна виділяються у тому ж кабелі, що і основні. Загальна надійність мережі істотно зростає, якщо волокна основного і додаткового трактів знаходяться в різних кабелях. Крім того, ці кабелі прокладаються за різними маршрутами для мінімізації ризику одночасного виходу з ладу. Таке поліпшення технічних характеристик мережі призводить до збільшення витрат на її реалізацію.

Лінійне резервування може бути організовано за схемами 1+1 і 1:1. При використанні першої схеми, наприклад, захист мультимплексної секції (*MSP, Multiplex Section Protection*), тобто ділянки мережі між двома суміжними мультимплексорами *SDH*, інформація передається одночасно в основному та резервному трактах (рис. 1). На приймальній стороні вибирається сигнал з найкращими якісними показниками. Зазвичай, таким вважається той з них, який має більш високий рівень, так як вибір між двома сигналами з різною потужністю не представляє будь-яких технічних проблем.

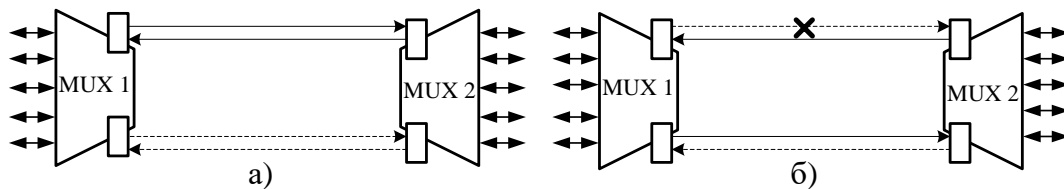


Рис. 1 Варіант захисту мультимплексної секції з використанням схеми 1+1: а) нормальний режим; б) режим використання резерву

У схемі 1:1 (рис. 2) додаткові ланцюги не несуть корисної інформації, але завжди готові взяти на себе її передачу, тобто знаходяться в режимі навантаженого резерву. В якості основного тракту, зазвичай, задіюється найкоротший маршрут або тракт з мінімальним загасанням. Перемикання на резерв здійснюється за аварійним сигналом, який система управління подає при повній втраті зв'язку або перевищенні визначеної межі частоти появи бітових помилок. Допустимий час перемикання для мереж *SDH* не повинен перевищувати 50 мс.

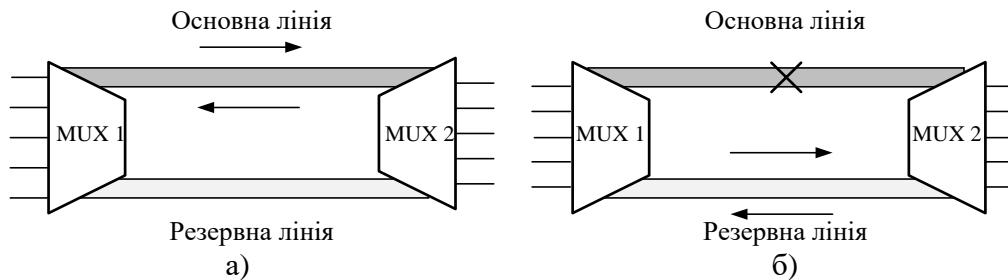


Рис. 2 Схема роботи ділянки мережі з лінійним резервуванням за схемою 1:1: а) нормальний режим; б) режим використання резерву

Після завершення ремонту пошкодженої ділянки у більшості випадків відновлюється первинна конфігурація мережі.

Крім застосування схеми 1:1 (100-відсоткове резервування), допустима організація резервування за схемою  $m:N$ , коли на  $N$  основних ланцюгів передачі приходиться  $m$  резервних.

При використанні в лінійній частині магістральної мережі кільцевих структур, які будуються на основі пари волокон (здвоєне кільце), застосовується схема резервування 1:1 [8 – 10]. При схемі 1:1 (рис. 3) відновлення зв'язку виконується наступним чином: пошкоджена ділянка волоконно-оптичної лінії виключається з тракту передачі, а на передавальних вузлах, що, безпосередньо, примикають до ушкодженої ділянки, відбувається

закільцювання трафіка (формується „петля”). Технічно це реалізується шляхом замикання передавача на приймач апаратури тих вузлів, які знаходяться на границі пошкодженої ділянки, в результаті сигнал перенаправляється на альтернативний маршрут.

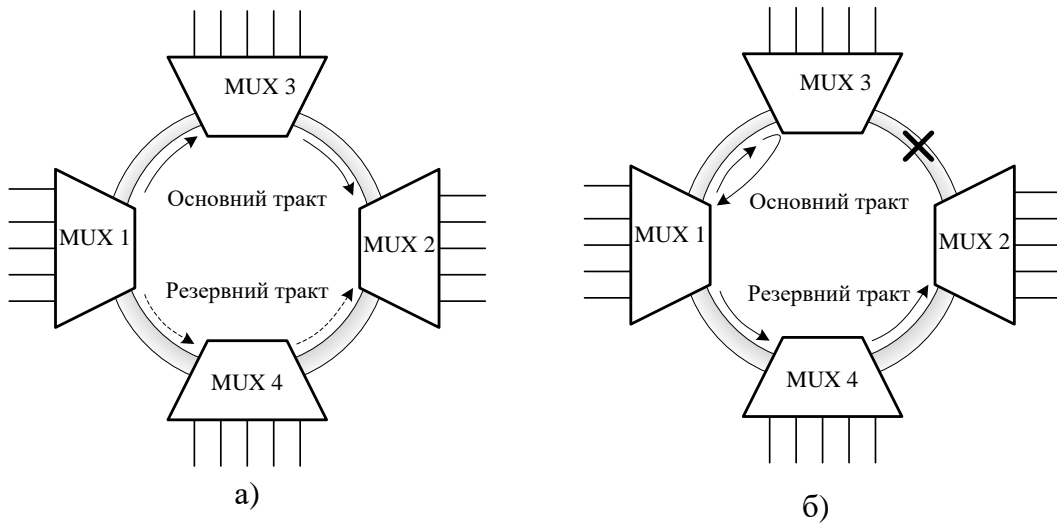


Рис. 3 Схема роботи ділянки мережі з лінійним резервуванням за схемою 1:1: а) нормальний режим; б) режим використання резерву

Недолік даного методу полягає у тому, що в міру зростання числа проміжних вузлів у кільці, ймовірність одночасного порушення зв'язку в основному і резервному півкільцях зростає. Це може призвести до припинення обслуговування декількох проміжних вузлів, а сама мережа розпадеться на кілька незв'язаних між собою фрагментів.

Для усунення цього недоліку в складних розгалужених мережах задача резервування часто вирішується за рахунок організації великої кількості окремих кілець та додаткових зв'язків між ними [11, 12].

Таким чином, все вище викладене дозволяє зробити висновок, що транспортна мережа може бути представлена сукупністю послідовних, паралельних або комбінованих (послідовно-паралельних, паралельно-послідовних) структур, які використовуються при обміні інформацією користувачами мережі.

В теорії надійності послідовною структурною схемою надійності називається така схема, при якій відмова хоча б одного елемента  $X_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , призводить до відмови всієї системи (рис. 4).

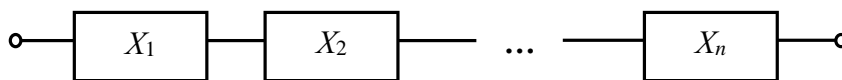


Рис. 4 Структурна схема надійності системи при послідовному з'єднанні елементів

Ймовірність безвідмовної роботи такої системи  $P(t)$  виражається формулою:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t), \quad (1)$$

де  $p_i(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента,  $i = \overline{1, n}$ .

Паралельною структурною схемою надійності називається така схема, при якій працездатність хоча б одного елемента забезпечує працездатність всієї системи (рис. 5). При паралельній структурній схемі надійності розрізняють три способи структурного резервування: постійне резервування (використовується навантажений резерв і при відмові будь-якого елемента в резервуючій групі виконання необхідних функцій забезпечується без перемикання, елементів, які залишилися), резервування заміщенням та ковзне резервування (ДСТУ) [1].

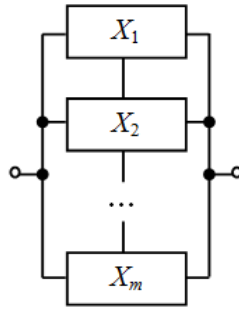


Рис. 5 Структурна схема надійності системи при паралельному з'єднанні елементів (постійне резервування)

При резервуванні заміщенням функції основного елемента (він один) передаються резервному тільки після відмови основного елемента (рис. 6). При ковзному резервуванні група основних елементів ( $n > 1$ ) резервується одним або декількома резервними елементами ( $m \geq 1$ ), кожний з яких може замінити будь-який з елементів даної групи у випадку його відмови (рис. 7).

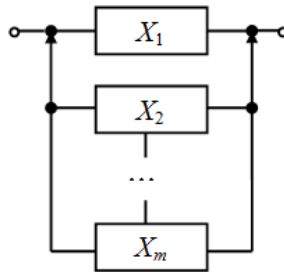


Рис. 6 Структурна схема надійності системи при резервуванні заміщенням

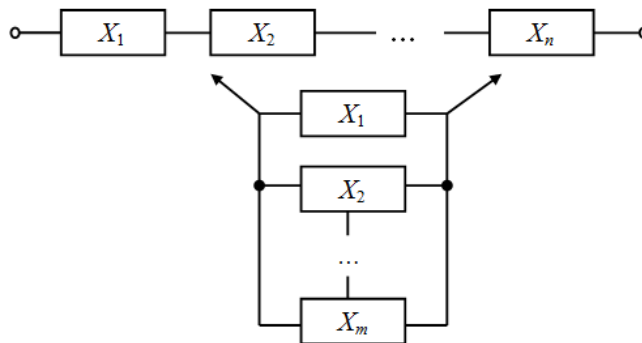


Рис. 7 Структурна схема надійності системи при ковзному резервуванні

Слід підкреслити, що при резервуванні заміщенням та ковзному резервуванні резервний елемент при відмові основного підключається в робочий режим не миттєво, а за кінцевий час (зазвичай, цей час представляє собою випадкову величину з невідомою функцією розподілу).

При паралельній структурній схемі надійності відмова системи (рис. 5) виникає тільки після відмови всіх її елементів. Тому ймовірність безвідмовної роботи системи виражається формулою:

$$P(t) = 1 - (1 - p_1(t))(1 - p_2(t)) \dots (1 - p_m(t)). \quad (2)$$

Формули для основних показників надійності телекомунікаційного обладнання мереж військового зв'язку при резервуванні заміщенням та ковзному резервуванні будуть отримані в наступних розділах роботи при повній вихідній інформації та в умовах апіорної невизначеності з урахуванням всіх основних факторів, що впливають на надійність.

Послідовно-паралельна структурна схема надійності представляє собою сукупність

послідовних підсистем, з'єднаних паралельно (рис. 8).

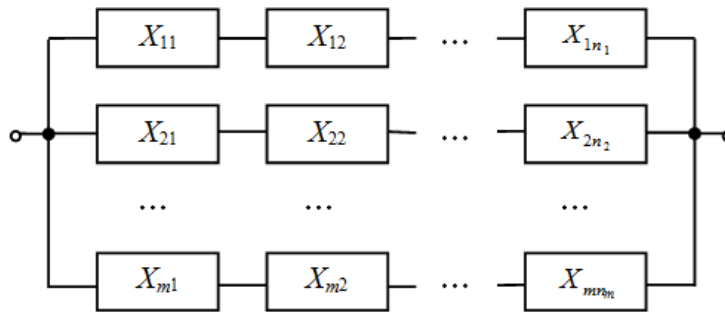


Рис. 8 Структурна схема надійності системи при послідовно-паралельному з'єднанні елементів

Ймовірність безвідмовної роботи такої системи виражається формулою:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1(t))(1 - P_2(t)) \dots (1 - P_m(t)), \quad (3)$$

де  $P_1(t) = \prod_{i=1}^{n_1} p_i(t)$ ;  $P_2(t) = \prod_{i=1}^{n_2} p_i(t)$ ; ...;  $P_m(t) = \prod_{i=1}^{n_m} p_i(t)$ .

Паралельно-послідовна структурна схема надійності представляє собою сукупність паралельних підсистем, з'єднаних послідовно (рис. 9).

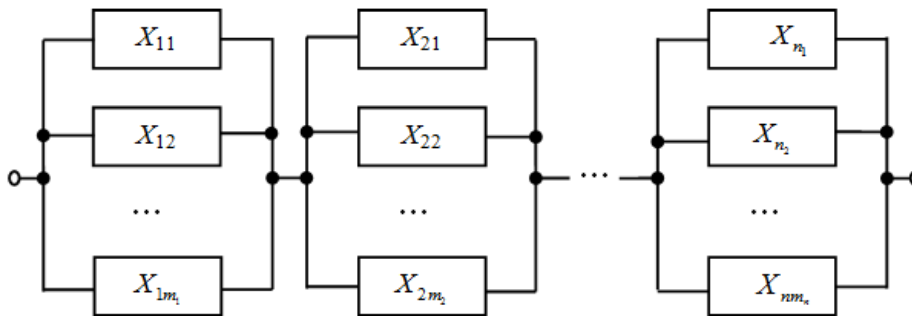


Рис. 9 Структурна схема надійності системи при паралельно-послідовному з'єднанні елементів

Ймовірність безвідмовної роботи системи при такому з'єднанні елементів на структурній схемі надійності може бути визначена за формулою:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \dots P_n(t), \quad (4)$$

де  $P_1(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m_1} (1 - p_i(t))$ ;  $P_2(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m_2} (1 - p_i(t))$ ; ...;  $P_n(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m_n} (1 - p_i(t))$ .

Системи з так званою „звідною структурою” [4] представляють собою системи зі складними структурними схемами надійності, які включають в себе всі розглянуті вище структурні схеми. Такі структури доцільно використовувати при дослідженні надійності шляхів та напрямків мереж зв'язку, у тому числі і мереж військового зв'язку.

При розрахунку показників безвідмовності систем зі звідною структурою доцільно дотримуватись приведеної нижче методики:

1. Спочатку на структурній схемі надійності виділяються ділянки, що складаються тільки з послідовно з'єднаних елементів. Для таких ділянок розраховуються значення показників безвідмовності за формулою (1), після чого ці ділянки замінюються еквівалентними елементами з отриманими для них значеннями показників безвідмовності.

2. На отриманій після перетворення (заміни ділянок еквівалентними елементами) новій структурній схемі надійності виділяються ділянки, що складаються тільки з паралельно

з'єднаних елементів. Для цих ділянок розраховуються значення показників безвідмовності за формулою (2), і після цього вони замінюються еквівалентними елементами з розрахованими для них показниками.

3. На даному етапі знов виділяються ділянки послідовно з'єднаних елементів, що з'явилися, та точно також замінюються еквівалентними елементами. Процес послідовного спрощення вихідної структурної схеми надійності продовжується до тих пір, поки структурна схема надійності не зведеться до єдиного еквівалентного елемента. Розраховані для нього значення показників безвідмовності будуть шуканими показниками безвідмовності системи.

Дану методику проілюструємо прикладом розрахунку ймовірності безвідмовної роботи для об'єкта, структурну схему надійності якого наведено на рис. 10.

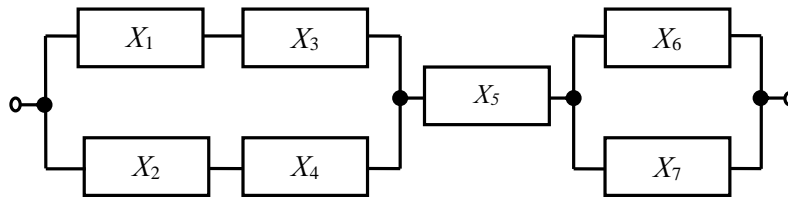


Рис. 10 Структурна схема надійності системи в прикладі, що розглядається

Ймовірність безвідмовної роботи елементів позначимо через  $p_i(t)$ ,  $i = \overline{1,7}$ . На першому кроці виділяємо послідовні ділянки: (1.3) та (2.4) (рис. 11). Замінюємо їх еквівалентними елементами з ймовірністю безвідмовної роботи

$$p_{1.3}(t) = p_1(t)p_3(t), \quad p_{2.4}(t) = p_2(t)p_4(t).$$

На другому кроці виділяємо паралельні ділянки. Їх дві: (1.3), (2.4) та (6.7). Замінюємо їх еквівалентними ділянками з ймовірністю безвідмовної роботи

$$p_{1-4}(t) = 1 - (1 - p_{1.3}(t))(1 - p_{2.4}(t)), \quad p_{6.7}(t) = 1 - (1 - p_6(t))(1 - p_7(t)).$$

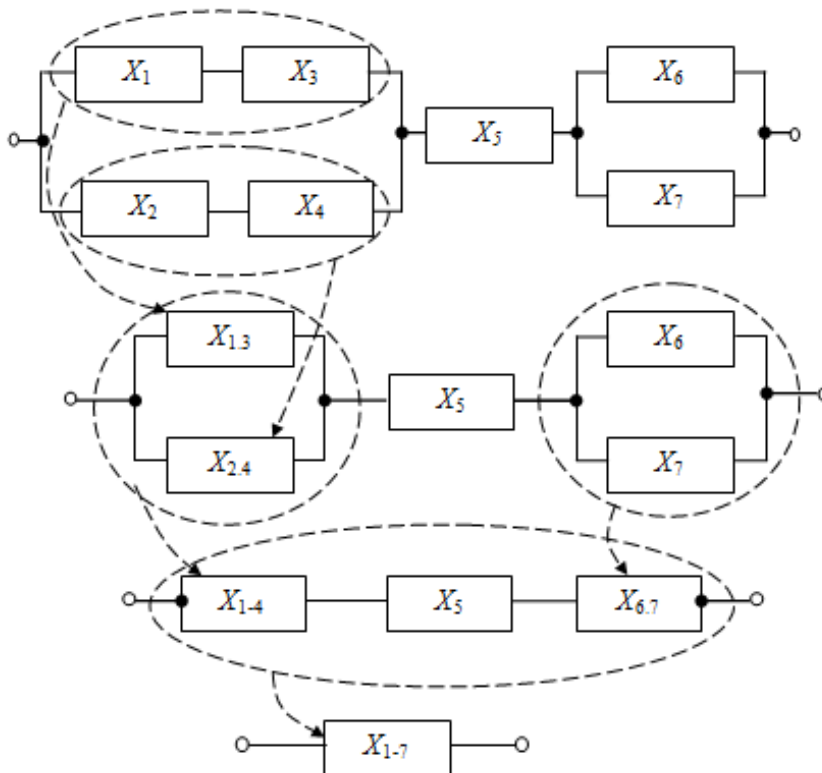


Рис. 11 Процес послідовного спрощення структурної схеми надійності  
На наступному кроці отримуємо єдиний еквівалентний елемент ймовірності

безвідмовної роботи якого дорівнює:

$$p_{1-7}(t) = p_{1-4}(t)p_5(t)p_{6,7}(t).$$

### Висновки

Таким чином, аналіз побудови транспортної мережі військового зв'язку показав, що її структура може бути представлена сукупністю послідовних, паралельних або комбінованих (послідовно-паралельних, паралельно-послідовних) структур, які використовуються при обміні інформацією користувачами мережі. При оцінці показників надійності напрямків та шляхів передачі інформації мережі військового зв'язку застосовується структурна схема надійності.

Запропонована методика побудови моделей безвідмовності дозволяє шляхом послідовного спрощення вихідної складної структурної схеми надійності МВЗ привести її до єдиного еквівалентного елемента та здобути для нього значення показників безвідмовності, що будуть шуканими показниками безвідмовності мережі.

Напрямок подальших досліджень є розробка методів та моделей комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання мереж військового зв'язку з урахуванням стійких відмов та збоїв при сумісному використанні структурного та навантажувального резервування при повної та обмеженої вихідної інформації.

### ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. – К.: Держстандарт України, 1994. – 160 с.
2. Креденцер Б.П. Оценка эксплуатационно-технических характеристик объектов телекоммуникаций при априорной неопределённости / Креденцер Б.П., Минович А.И., Могилевич Д.И. // Под научной ред. Б.П. Креденцера. – К.: „Феникс”, 2012. – 336 с.
3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Черкесов Г.Н. – СПб: Питер, 2005. – 479с.
4. Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов / И.А. Ушаков, К. Райшне / Под ред. профессора И.А. Ушаков. – М.: „Радио и связь”, 1988. – 208 с.
5. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: Монографія / [Б.П.Креденцер, О.М. Буточнов, А.І.Міночкін, Д.І.Могилевич] – К.: „Фенікс”, 2013. – 342с.
6. W. Ahmada Reliability modeling and analysis of communication networks / W. Ahmada, U. Pervez, J. Qadirb. // Journal of Network and Computer Applications. – V.78. – 15 January. – 2017, P. 191 – 215.
7. V. Devis Dependability in Future Battle Network System – Transport Layer Ability to Maintain Quality of Service / V. Devis // Center for Applied Research, Estonian National Defence College, Tartu, Estonia. – 2016, P. 211 – 228.
8. Хмелев К. Основы фотонного транспорта / Хмелев К. // Под научной ред. Член-корреспондента НАН Украины, д.т.н., профессора М.Е. Ильченко. – К.: „Техника”, 2008. – 680 с.
9. Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов. – Новосибирск. – СибГУТИ, 2016. – 156 с.
10. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети / В.Г. Фокин – Новосибирск. – СибГУТИ, 2015. – 371 с.
11. Хмелев К. Основы SDN / Хмелев К. // Под научной ред. д.т.н., профессора А.В. Доровских. – К.: ИВЦ „Видавництво „Політехніка””, 2003. – 584 с.
12. Ильченко М.Ю. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП „Видавництво „Наукова думка”” НАН України, 2008. – 238 с.