

**Кононова Ірина Віталіївна**

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ*

ORCID 0000-0001-6945-0323

**Дубина Віталій Олександрович**

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ*

ORCID 0000-0002-4694-078X

## МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ СУМІСНОМУ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ І УРАХУВАННІ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

**Анотація.** Однією з найважливіших завдань сучасної науки і техніки є створення складних технічних систем різного цільового призначення, від ефективного й надійного функціонування котрих залежать всі області людської діяльності. Електронні комунікаційні мережі відносяться до таких складних технічних систем, основу яких складає електронне комунікаційне обладнання (ЕКО).

Зростаюча складність комунікаційних мереж не дозволяє забезпечити необхідні показники надійності функціонування тільки за рахунок підвищення якості їх складових елементів. Теоретичні дослідження та практика експлуатації показали, що введення в ЕКО різних видів надлишковості є ефективним шляхом забезпечення вимог до показників надійності електронної комунікаційної мережі.

Метою дослідження є удосконалення науково-методичного апарату оцінки показників надійності електронного комунікаційного обладнання при використанні різних методів резервування та з урахуванням характеристик контролю працездатності.

В статті сформульовано постановку задачі та розроблено наближений метод її вирішення, заснований на послідовному укрупненні моделей надійності ЕКО при сумісному використанні різних методів резервування і урахуванні характеристик контролю працездатності, що дозволило подолати складнощі пов'язані з ускладненням математичного апарату та отримати розрахункові формули для показників надійності резервованих об'єктів. Побудовані моделі надійності встановлюють зв'язок між показниками надійності функціонування ЕКО, наслідками відмов та їх характеристиками, а також сукупністю технічних параметрів, що визначають умови його функціонування.

Запропоновані моделі мають важливе значення для оцінки показників надійності електронного комунікаційного обладнання.

**Ключові слова:** моделі надійності, електронне комунікаційне обладнання, резервування, надлишковість, контроль працездатності, відмови.

**Kononova Iryna**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

ORCID 0000-0001-6945-0323

**Dubyna Vitaliy**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

ORCID 0000-0002-4694-078X

## RELIABILITY MODELS OF ELECTRONIC COMMUNICATION EQUIPMENT AT JOINT USE OF DIFFERENT METHODS OF REDUNDANCY AND TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF PERFORMANCE CONTROL

**Abstract.** One of the most important tasks of modern science and technology is the creation of complex technical systems for various purposes, the efficient and reliable functioning of which affects all areas of

human activity. Electronic communication networks are among such complex technical systems based on electronic communication equipment (ECE).

The growing complexity of communication networks does not allow to ensure the required indicators of reliability of functioning only by improving the quality of their components. Theoretical studies and operational practice have shown that the introduction of various types of redundancy in the ECE is an effective way to meet the requirements for the reliability of the electronic switching network.

The aim of the study is to improve the scientific and methodological apparatus for assessing the reliability of electronic communication equipment using various redundancy methods and taking into account the characteristics of performance monitoring.

The article formulates the problem statement and develops an approximate method for its solution based on the consistent consolidation of ECO reliability models with the combined use of various redundancy methods and taking into account the characteristics of performance monitoring, which made it possible to overcome the difficulties associated with the complexity of the mathematical apparatus and obtain calculation formulas for the reliability indicators of redundant objects. The constructed reliability models establish a link between the reliability indicators of the ECO functioning, the consequences of failures and their characteristics, as well as a set of technical parameters that determine the conditions of its functioning.

The proposed models are important for assessing the reliability of electronic communication equipment.

**Keywords:** reliability models, electronic communication equipment, redundancy, redundancy, performance monitoring, failures.

### 1. Постановка проблеми.

Електронне комунікаційне обладнання належить до класу складних технічних систем, що має низку специфічних особливостей і ознак. Найважливішою особливістю сучасного обладнання, що використовується в електронних комунікаційних мережах, є впровадження різних видів надлишковості для підвищення надійності та забезпечення безперебійної роботи мережі.

Наразі існує актуальне завдання щодо побудови моделей надійності даного класу резервованих систем на основі методу послідовного укрупнення моделей (створенні чотирьохрівневої, за кількістю сумісно використовуваних видів надлишковості, ієрархії послідовно укрупнюваних моделей надійності).

### 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Глибокі зміни в техніці зв'язку та обчислювальній техніці в останні два десятиліття призвели до інтеграції електронних комунікаційних мереж та комп'ютерних мереж, що уможливило створення єдиної складної інформаційної мережі, а найближче майбутнє підводить нас до нової епохи – інформування суспільства та розроблення глобальної інформаційної інфраструктури [1 – 3]. Не викликає сумніву той факт, що на ефективність функціонування такої складної системи істотний вплив чинитиме надійність складових її підсистем і елементів [4, 5].

До теперішнього часу виконано цілу низку теоретичних і прикладних праць, у яких розглянуто різні аспекти побудови, експлуатації (застосування) та оцінювання ефективності функціонування електронних комунікаційних мереж [6 – 8]. Однак у переважній більшості з них не розглядаються питання, пов'язані зі створенням моделей надійності при сумісному використанні різних методів резервування і урахуванні характеристик контролю працездатності.

### 3. Мета і задачі дослідження.

Метою статті є побудова моделей надійності при сумісному використанні різних методів резервування з урахуванням характеристик контролю працездатності, що дозволить проводити оцінку показників надійності резервованої системи зі знецінюючими відмовами.

### 4. Результати дослідження.

Укрупнення моделі надійності системи при сумісному використанні різних методів резервування і урахуванні характеристик контролю працездатності. Розроблена в [9] модель надійності об'єктів ЕКО з непоповнюваним резервом часу  $t_p$  і знецінюючими відмовами може бути використана для утворення пар моделей, що укрупнюються з моделями 5, в яких враховані характеристики контролю працездатності. Пари укрупнюваних моделей представлені на рис. 1. Розрахункові формули для показників надійності системи при комплексному використанні надлишковості з урахуванням характеристик контролю працездатності можуть бути отримані на заключному етапі вирішення задачі – на четвертому рівні ієрархії укрупнення вказаних вище пар моделей резервованих систем.



Рис. 1. Пари укрупнюваних моделей на третьому рівні ієрархії укрупнення

Результати, отримані в [9], показують, що кожна з моделей 5 на рис. 1 може бути представлена одним узагальненим елементом, напрацювання до відмови якого розподілена за експоненціальним законом з параметром  $\Lambda_{0i} = 1/\bar{T}_0(t_d)$ ,  $i = \bar{1}, 4$ , де формула

для  $\Lambda_{01}$  отримана при ідеальному контролі

$$\Lambda_{01} \cong n\lambda \left[ q + \frac{x\rho^m}{m!} (n + m_H + \alpha m_0)^{m_{HH}+1} \prod_{i=0}^{m_0-1} (n - m_H + i\alpha) \prod_{i=1}^{m_H-1} (n + i) \right];$$

для  $\Lambda_{02}$  – при неповному контролі

$$\Lambda_0 = \sum_{i=0}^m \pi_i b_{i,E_-} / \sum_{i=0}^m \pi_i a_i;$$

для  $\Lambda_{03}$  – при недостовірному контролі

$$\bar{T}_0(t_d) \approx 1 / \Lambda_{03};$$

для  $\Lambda_{04}$  – при періодичному контролі

$$\Lambda_{04} = \sum_{i=0}^m \pi_i b_{i, E-} / \sum_{i=0}^m \pi_i a_i.$$

Розрахункові співвідношення для  $\Lambda_{0i}$ ,  $i = \overline{1,4}$ , є наближеними. Проведений в [9] аналіз показав, що похибка  $\delta$  цих формул суттєво залежить від величини малого параметра  $\rho = \lambda/\mu$  і при  $\rho < 10^{-2}$  значення  $\delta < 10\%$  для найгіршого випадку.

Таким випадком для алгоритму асимптотичного укрупнення є резервована система з одним резервним елементом ( $n \geq 1, m=1$ ).

Надалі необхідно знайти середнє значення часу відновлення працездатності  $\bar{T}_B(t_d)$  системи зі структурним, навантажувальним і поповнюваним часовим резервуванням. Для цього скористаємося методом, в основі якого лежить регенеруючий процес спеціального типу, який дозволяє отримати наближені (асимптотичні) формули для показників надійності даного класу систем при ідеальному контролі і при наявності малого параметру  $\rho = \lambda \bar{t}_B \ll 1$ . В роботі [10] наведена наближена формула для ймовірності відмови таких систем:

$$q_0 = q_1 + q_2 = \prod_{i=1}^m \lambda_i \int_x^\infty (1 - F_B(t))^{l-1} \frac{1 - F_B(x)}{(l-1)!} + \frac{qn\lambda}{\lambda_0}, \quad (1)$$

де  $q_1$  – ймовірність події  $A$  – відмови  $m+1$  елементів в одному періоді регенерації (точки регенерації – це моменти завершення ремонту всіх відмовивших елементів);

$q_2$  – ймовірність події  $B$  – поява тривалого підключення  $t_{\Pi} > t_d$  резервного елемента замість відмовившого основного в тому ж періоді за умови, що подія  $A$  не відбулася;

$F_B(t)$  – функція розподілу часу відновлення одного елемента (кожна з ремонтних бригад  $l$  може одночасно відновлювати тільки один елемент);

$\lambda_i$  – сумарна інтенсивність відмов елементів за умови, що в даний момент непрацездатним є  $i$  елементів ( $i = \overline{0, m}$ ).

В окремому випадку при обмеженому ( $l=1$ ) або необмеженому ( $l=m+1$ ) відновленні загальна формула (1) спрощується:

$$q_0 = q_1 + q_2 = \begin{cases} \frac{\beta_m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i + \frac{qn\lambda}{\lambda_0}, & l=1, \\ \frac{\beta_l}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i + \frac{qn\lambda}{\lambda_0}, & l \geq m, \end{cases} \quad (2)$$

де 
$$\beta_m = \int_0^\infty x^m dF_B(x). \quad (3)$$

Середній час відновлення працездатності  $\bar{T}_B(t_d)$  резервованої системи, яка розглядається, визначається виразом:

$$\bar{T}_B(t_d) = \frac{1}{q_0} (q_1 \bar{T}_B^* + q_2 L), \quad (4)$$

де  $q_0 = q_1 + q_2$ ;

$$q_1 = \begin{cases} \frac{\beta_m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l=1, \\ \frac{\beta_1}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l \geq m; \end{cases} \quad q_2 = \frac{qn\lambda}{\lambda_0}; \quad (5)$$

$$\bar{T}_B^* = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m}, & l=1, \\ \frac{\beta_1}{m+1}, & l=m+1. \end{cases} \quad (6)$$

У формулі (4)  $L$  – середнє значення перевищення часу підключення  $t_{\Pi}$  резервного елемента над резервом часу  $t_d$ :

$$L = \frac{\bar{t}_{\Pi} - M \min(t_{\Pi}, t_d)}{1 - F_{\Pi}(t_d)}$$

при  $F_{\Pi}(t_d) = 1 - \exp(-\mu_{\Pi}t_d)$  отримуємо

$$L = \frac{1}{\mu_{\Pi}} (1 - e^{\mu_{\Pi}t_d}). \quad (7)$$

Нехай  $F_B(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ , тоді у формулах (2) – (6)  $\beta_1 = \bar{t}_B = \frac{1}{\mu}$ ;  $\beta_m = \frac{m!}{\mu^m}$ . При цьому допущенні функція розподілу часу відновлення  $F_B^*(t)$  розглядаємої системи, представленої у вигляді одного узагальненого елемента, може бути оцінена за наближеною формулою:

$$F_B^*(t) \approx 1 - \exp(-Mt) \quad (8)$$

де  $M = \frac{1}{\bar{T}_B(t_d)}$  або з урахуванням формули (4)

$$M = q_0 (q_1 \bar{T}_B^* + q_2 L)^{-1}. \quad (9)$$

Якщо врахувати відмічену раніше особливість системи з непоповнюваним резервом часу і знецінюючими відмовами – слабку залежність  $P(t_3, t_{\Pi})$  від часу відновлення  $\bar{T}_B(t_d)$ , то можна зробити висновок щодо можливості використання формули (9) при укрупненні моделей на третьому рівні (рис. 1) з урахуванні реальних характеристик контролю (неповноти, недостовірності, періодичності).

Враховуючи це і підставляючи у формули отримані в [9] модель з непоповнюваним резервом часу замість  $\lambda$  і  $\mu$  значення інтенсивностей  $\Lambda_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  і  $M$  укрупнених моделей 5, можна отримати розрахункові співвідношення для показників надійності розглядаємої системи на заключному, четвертому рівні укрупнення (рис. 1).

Ці формули для показників надійності  $P(t_3, t_p, t_d)$ ,  $\bar{T}_{B3}(t_3)$  і  $\Lambda(t_3, t_p, t_d)$  системи при сумісному використанні різних методів резервування (структурного, навантажувального, часового з поповнюваною  $t_d$  і непоповнюваною  $t_p$  складовими) та урахуванні характеристик контролю працездатності наведено в табл. 1.

Формули для показників надійності  $P(t_3, t_p, t_d)$ ,  $\bar{T}_{B3}(t_3)$  і  $\Lambda(t_3, t_p, t_d)$  резервованої системи зі знецінюючими відмовами

Показник	Умова	Формула
$P(t_3, t_p, t_d)$	$t_B > 0,$ $i \geq 1$	$\sum_{i=0}^{[m_t]} [A_i(t_p - it_3) - A_{i+1}(t_p - it_3)] e^{-(i+1)\rho},$ $A_i(t) = C_{2i-1}^i (pq)^i + \sum_{j=0}^{i-1} C_{i+j-1}^j C_{i-1}^j \frac{j!}{i!} p^i q^j (\Lambda_{0k} t)^{i-1-j} \times$ $\times \left( \frac{i(-1)^{i-j}}{i-j} \Lambda_{0k} t - (i+j) q e^{-(\Lambda_{0k} t + M)t} \right), i \geq 1,$ $m_t = t_p / t_3; A_0 = 1; p = 1 - q = \frac{M}{\Lambda_{0k} + M}; \rho = \Lambda_{0k} t_3$
$P(t_3, t_p, t_d)$	$t_B > 0,$ $t_p \leq t_3$	$e^{-\rho} [1 - A_1(t_p)] = pq(1 - x - e^{-x}),$ $x = (\Lambda_{0k} + M)t; t = t_3 + t_p; \rho = \Lambda_{0k} t_3$
$P(t_3, t_p, t_d)$	$t_B > 0,$ $t_3 \leq t_p \leq 2t_3$	$e^{-\rho} [1 - A_1(t_p)] + e^{-2\rho} [A_1(t_p - t_3) - A_2(t_p - t_3)],$ $A_1\left(\frac{x}{\Lambda_{0k} + M}\right) = pq(1 - x - e^{-x}),$ $A_2\left(\frac{x}{\Lambda_{0k} + M}\right) = (pq)^2 \left( \frac{x^2}{2} - 2x + 3 - (3+x)e^{-x} \right); \rho = \Lambda_{0k} t_3$
$P(t_3, t_p, t_d)$	$t_B = 0$	$\sum_{i=0}^{[m_t]} (-1)^i \left[ \frac{(\gamma - i\rho)^i}{i!} + \frac{(\gamma - i\rho)^{i+1}}{(i+1)!} \right] e^{-(i+1)\rho}, \gamma = \Lambda_{0k} t_p$
$\bar{T}_{B3}(t_3)$	$t_B > 0$	$(\bar{t}_0 + \bar{t}_B)(e^{\Lambda_{0k} t_3} - 1); \bar{t}_0 = 1/\Lambda_{0k}; \bar{t}_B = 1/M$
$\bar{T}_{B3}(t_3)$	$t_B = 0$	$(e^{\Lambda_{0k} t_3} - 1) / \Lambda_{0k}$
$\Lambda(t_3, t_p, t_d)$	$t_B > 0,$ $i \geq 1,$ $A_0 = 1$	$\left[ \sum_{i=0}^{[t_p/t_3]} e^{-(i+1)\rho} \left[ \Lambda_{0k}(i+1)(A_i(t_p - it_3) - A_{i+1}(t_p - it_3)) + \right. \right. / P(t_3, t_p, t_d),$ $\left. \left. + i(A_i^*(t_p - it_3) - A_{i+1}^*(t_p - it_3)) \right) \right]$ $A_i^*(t) = \Lambda_{0k} C_{2i-1}^{i-1} p^i q^{i-1} \left( 1 - \frac{2i-1}{i} e^{-(\Lambda_{0k} + M)t} \right) +$ $+ \Lambda_{0k} \sum_{j=0}^{i-2} \frac{(i+j-1)! p^i q^j (\Lambda_{0k} t)^{i-2-j}}{i! j! (i-j-1)!} \times$ $\times \left[ (-1)^{i-j} i \Lambda_{0k} t - (i+j) \left( q(i-j-1) - \Lambda_{0k} t e^{-(\Lambda_{0k} + M)t} \right) \right], \rho = \Lambda_{0k} t_3$

$\Lambda(t_3, t_p, t_d)$	$t_B > 0,$ $t_3 \leq t_p < 2t_3$	$\Lambda_{0k} \left\{ 1 + e^{-2\rho} \left[ A_1(t_p - t_3) - A_2(t_p - t_3) + \right. \right. \\ \left. \left. A_1^*(t_p - t_3) - A_2^*(t_p - t_3) \right] \right\} / P(t_3, t_p, t_d); \rho = \Lambda_{0k} t_3,$ $A_1^*(t) = -p(1 - e^{-x}); A_2^*(t) = p^2 q(x - 2 + (2 + x)e^{-x}); x = (\Lambda_{0k} + M)t$
$\Lambda(t_3, t_p, t_d)$	$t_B = 0$	$\Lambda_{0k} (1 + \gamma) e^{-\rho} + \Lambda_{0k} \sum_{i=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} (-1)^i \frac{(\gamma - i\rho)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-(i+1)\rho} \times$ $\times \left[ (2 + 1/i)(\gamma - i\rho) + i + \frac{(\gamma - i\rho)^2}{i} \right] / P(t_3, t_p), \quad \gamma = \Lambda_{0k} t_p, \rho = \Lambda_{0k} t_3$

Послідовності розрахунків інтенсивностей відмов укрупнених моделей 5  $\Lambda_{0k}, k = \overline{1,4}$ , що входять у формули табл. 1, наведені в [9, 11] при розгляді кожного способу контролю працездатності: при ідеальному контролі; при недостовірному контролі; при періодичному контролі. Для розрахунку інтенсивності відновлення може бути використана формула (9) з урахуванням (5) – (8).

### 5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Показано доцільність використання укрупнення моделей надійності, в основі якого лежить принцип параметризації – один з важливих принципів побудови математичної моделі складних систем та отримано розрахункові формули для показників надійності резервованої системи зі знецінюючими відмовами. Отримані розрахункові формули є наближеними, оцінку їх відносної похибки буде проведено в наступних дослідженнях.

### Список використаної літератури

1. Alessandro V. Reliability Engineering. Theory and Practice. Springer, 2017. 651 p.
2. Невзоров А.В., Скляренко О.В., Колодінська Я.О., Яровий Р.О. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем та обладнання в сучасних умовах. Прикладні питання математичного моделювання. 2023. Т. 6, № 1. С. 117 – 123.
3. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. Information Technology and Security. 2022 Vol. 10, № . С 50 – 59.
4. Князева Н., Нєнов О. Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання. Вісник Університету «Україна» Серія Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. 2021. № 2(23). С. 110 – 118.
5. Борисова Л.В., Загора О.В., Фещенко А.Б. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. Problems of Emergency Situations. 2020. № 1(31). С. 34 – 43.
6. Schmidt Jan H. Using Fast Frequency Hopping Technique to Improve Reliability of Underwater Communication System. MDPI. Basel. 2020. №10 (3). P. 2 – 12.
7. She Ch., Liu Ch., Tony Q., Quek S., Yang Ch., Li Y. Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in Unmanned Aerial Vehicle Communication Systems. Transactions on Communications. 2019. № 67 (5). P. 3768 – 3781.
8. Ahmed N.O., Bhargava B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. IEEE Transactions on Cloud Computing. 2020. № 8(3), P. 847–860.

9. Дубина В.О. Кононова І.В. Моделі надійності електронного комунікаційного обладнання з урахуванням характеристик контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 35 (74) № 1, 2024. С. 43–49.

10. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser V., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2020. № 80. С. 39 – 47.

11. Креденцер Б., Міночкін А., Могилевич І. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 342 с.

### References

1. Alessandro B. Reliability Engineering. Theory and Practice. Springer, 2017. 651 p.

2. Nevzorov A.V., Sklyarenko O.V., Kolodinska Ya.O., Yarovy R.O. Peculiarities of analytical support for the operation of information systems and equipment in modern conditions. Applied problems of mathematical modeling. 2023. Vol. 6, No. 1. P. 117 – 123.

3. D. I. Mogilevich, V. V. Sinko. Reliability models of telecommunication equipment objects with undiscounted or fully undiscounted software failures. Information Technology and Security. 2022 Vol. 10, No. C 50 – 59.

4. Knyazeva N., Nenov O. Assessment of structural reliability of telecommunication networks of uncertain topology based on simulation modeling. Bulletin of the University "Ukraine" Series Informatics, computer technology and cybernetics. 2021. No. 2(23). P. 110 – 118.

5. Borysova L.V., Zakora O.V., Feshchenko A.B. Development of a probabilistic model of an elementary fragment of the departmental information and telecommunication network. Problems of Emergency Situations. 2020. No. 1(31). P. 34 - 43.

6. Schmidt Jan H. Using Fast Frequency Hopping Technique to Improve Reliability of Underwater Communication System. MDPI. Basel. 2020. No. 10 (3). R. 2 - 12.

7. She Ch., Liu Ch., Tony Q., Quek S., Yang Ch., Li Y. Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in Unmanned Aerial Vehicle Communication Systems. Transactions on Communications. 2019. No. 67 (5). R. 3768 - 3781.

8. Ahmed N.O., Bhargava B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. IEEE Transactions on Cloud Computing. 2020. No. 8(3), P. 847–860.

9. Dubina V.O. Kononova I.V. Reliability models of electronic communication equipment taking into account control characteristics. Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: Technical sciences. Volume 35 (74) No. 1, 2024. С. 43–49.

10. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser V., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure. Bulletin of NTUU "KPI". Radio engineering series, Radio equipment construction. 2020. No. 80. P. 39 – 47.

11. Kredentser B., Minochkin A., Mogilevich I. Reliability of systems with redundancy: methods, models, optimization: monograph. Kyiv: Phoenix, 2013. 342 p.