

УДК 004.738.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/12>**Субач І.Ю.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Могилевич Д.І.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Урядов А.В.**

незалежний дослідник

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ВИКОРИСТАННІ НАДЛИШКОВОСТІ

*На ефективність функціонування сучасних електронних комутаційних мереж істотний вплив мають надійність складових її підсистем і елементів, а також складність зв'язків між ними.*

*Наведено результати теоретичного дослідження моделей надійності, що встановлюють зв'язок між показниками надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання, характеристиками відмов та їх наслідків, а також сукупністю технічних параметрів об'єкту, що визначають умови його функціонування, в якому сумісно реалізовані різні методи резервування (структурного, навантажувального і часового з поповнюваною та непоповнюваною складовими резервного часу).*

*Об'єктом теоретичного дослідження є процеси функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання. Метою роботи є аналіз результатів оцінки теоретичного дослідження впливу різних факторів на показники надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання в умовах їхньої обмеженої надійності. Оцінка надійності визначається сумісним врахуванням у проаналізованих аналітичних моделях факторів, які впливають на надійність функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання.*

*Проведений аналіз дав можливість кількісно оцінити ефективність різних методів резервування при їх сумісному використанні в об'єктах електронного комунікаційного обладнання зі знецінюючими відмовами і врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів, а також виявити деякі специфічні особливості та властивості отриманих аналітичних співвідношень показників надійності електронного комунікаційного обладнання.*

**Ключові слова:** надійність, методи резервування, надлишковість, електронне комунікаційне обладнання, контроль працездатності, відмови.

**Постановка проблеми.** В останні десятиліття вимоги практики висувають перед теорією надійності велике число нових, дедалі складніших завдань. Це проявляється не тільки в отриманні нових теоретичних результатів, а й у поглибленому дослідженні відомими методами окремих, відносно маловивчених розділів надійності, що мають важливе прикладне значення. Одним із них є розділ, пов'язаний із вивченням надмірності, її місця і ролі в загальному комплексі методів підвищення надійності, з дослідженням загальних і часткових властивостей їхнього спільного використання. Актуальність цього напряму досліджень у теорії та практиці надійності не викликає сумніву, оскільки введення надмірності – необхідна умова забезпечення нормального функціонування будь-якої складної системи (до якої також належить електронна комутаційна мережа) в умо-

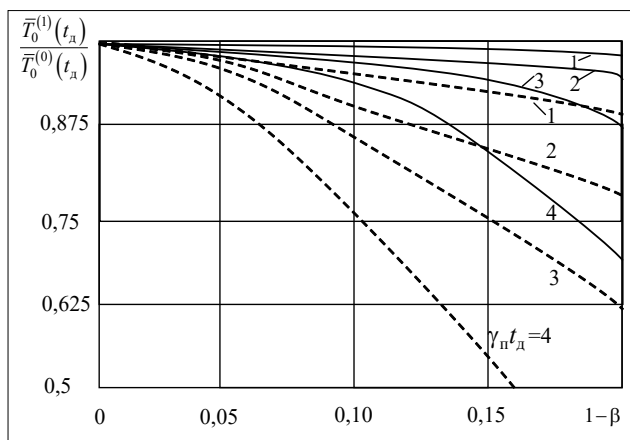
вах впливу зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Завдання оцінки та забезпечення високого рівня надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) розглядалися в роботах вітчизняних та закордонних вчених [1–6]. В розглянутих наукових працях практично відсутні результати, що стосуються оцінки показників надійності об'єктів ЕКО зі знецінюючими відмовами при комплексному використанні надлишковості та врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів

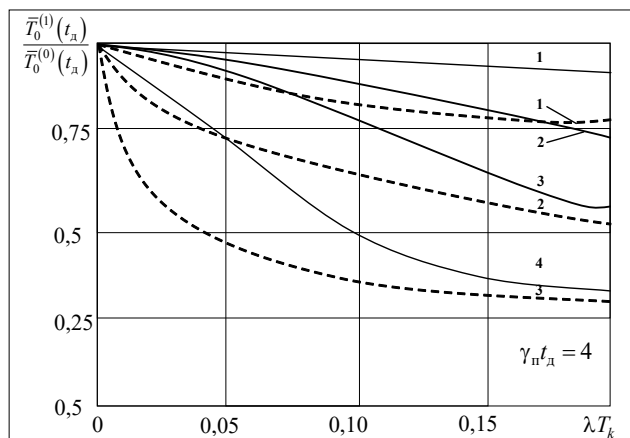
**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз результатів оцінки показників надійності об'єктів ЕКО зі знецінюючими відмовами при комплексному використанні надлишковості та врахуванням характеристик контролю працездатності резервних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Спочатку наведемо деякі результати теоретичного дослідження отриманих в [7] розрахункових формул, які дозволяють кількісно оцінити вплив характеристик контролю (повноти, періодичності та достовірності) на показники безвідмовності системи зі структурним, навантажувальним і поповнюваним часовим резервуванням [8], а потім розглянемо результати, які відносяться до системи з ідеальним контролем та комплексним використанням надлишковості, включаючи і непоповнювану складову резерву часу [9].

Оцінка впливу характеристик контролю на показники резервованої системи. На рис. 1–4 наведені результати розрахунків, які дозволяють оці-



**Рис. 1.** Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від повноти контролю  $(1-\beta)$  при  $\lambda/\mu = 10^{-2}$  і різних значеннях  $\gamma_n t_d$   
 —————  $m = 2$ ; - - - - -  $m = 1$



**Рис. 2.** Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від відносної періодичності контролю  $\lambda T_k$  при  $\lambda/\mu = 10^{-2}$  і різних значеннях  $\gamma_n t_d$   
 —————  $m = 1$ ; - - - - -  $m = 2$  (модель 2)

нити степінь зниження середнього напрацювання до відмови  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  з урахуванням характеристик контролю в порівнянні з цим же показником при ідеальному контролі  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  для різних значень  $\gamma_n t_d$ , а також числа резервних елементів  $m$ .

На рис. 1 представлено залежність відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від повноти контролю. Аналіз показує, що для систем із структурною надлишковістю і поповнюваним резервом часу урахування повноти контролю призводить до істотної зміни величини середнього напрацювання до відмови.

Так, при  $\beta = 0,95$  ( $\gamma_n t_d = 4, m = 1$ ) значення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  зменшується в порівнянні з  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 1,09 рази, при  $\beta = 0,9$  – в 1,36 рази, при  $\beta = 0,85$  – в 1,83 рази, а при  $\beta = 0,8$  – в 2,55 рази. Слід відмітити, що при збільшенні значення  $\gamma_n t_d$  залежність відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\beta$  стає більш помітною. Так, зменшення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 4, m = 1$  перевищує аналогічну зміну  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 1, m = 1$  для  $\beta = 0,95$  в 1,08 рази, для  $\beta = 0,9$  – 1,3 рази, для  $\beta = 0,85$  – в 1,69 рази, для  $\beta = 0,8$  – 2,25 рази. Ця обставина дозволяє зробити висновок про те, що зменшення повноти контролю призводить до істотного зниження показників надійності системи і ефективності використання поповнюваного резерву часу. Введення структурної надлишковості ( $m > 1$ ) призводить до зниження впливу повноти контролю, причому сильніше ця властивість виявляється для систем з великим значенням  $\gamma_n t_d$ . Отже, при  $\beta = 0,8$  збільшення структурного резерву  $m$  до двох призводить до збільшення значення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  при  $\gamma_n t_d = 1$  в 1,1 рази, а при  $\gamma_n t_d = 4$  – в 1,76 рази.

На рис. 2 представлено залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від величини параметра  $\lambda T_k$ .

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновок, який є аналогічним випадку неповного контролю, з тією лише особливістю, що впливи  $\lambda T_k$  істотніше позначається на зниженні середнього напрацювання системи до відмови. Так, при  $\gamma_n t_d = 4, m = 1$  і  $\lambda T_k = 0,05$  величина  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)$  зменшується в порівнянні з  $\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 3,5 рази, при  $\lambda T_k = 0,1$  – в 4,1 рази, при  $\lambda T_k = 0,15$  – в 7,1 рази, а при  $\lambda T_k = 0,2$  – в 8,5 рази. Введення структурної надлишковості є найефективнішим при невеликих значеннях  $\lambda T_k < 0,1$ . Отже, при  $\lambda T_k = 0,05, \gamma_n t_d = 4, m = 1$  введення ще одного резервного елемента збільшує  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  в 2,85 рази, а при  $\lambda T_k = 0,15$  – в 2,36 рази.

На рис. 3 і рис. 4 наведено залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від наведеної інтен-

сивності помилок другого роду  $\lambda_2/\lambda$  (пропуск відмови) і першого роду  $\lambda_1/\lambda$  (помилкове спрацювання обладнання контролю). Збільшення інтенсивності відмов, пропущених обладнанням контролю, призводить до зменшення відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$ .

Збільшення інтенсивності помилкових спрацювань обладнання контролю призводить до збільшення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  (рис. 4), оскільки в цьому випадку усуваються приховані відмови, існуючі в обладнанні за рахунок помилок другого роду.

Проте вплив цього чинника є значно меншим за розглянуті раніше. Так, при  $m=1$ ,  $\lambda_1/\lambda=0,1$  і  $\gamma_{пt_d}=4$  величина середнього напрацювання системи до відмови зменшується для  $\lambda_2/\lambda=0,05$  в 1,08 рази, для  $\lambda_2/\lambda=0,1$  – в 1,3 рази, а для  $\lambda_2/\lambda=0,15$  – в 1,7 рази.

Таким чином, проведений аналіз надійності систем з часовою, структурною і навантажувальною надлишковістю з урахуванням реальних характеристик обладнання контролю працездатності показує, що періодичність, повнота і достовірність контролю резервних елементів призводить до істотного зниження ефективності часового резервування. Для досягнення необхідних значень показників надійності таких систем необхідно збільшувати надлишковість або задавати жорсткіші вимоги до характеристик обладнання контролю працездатності елементів структурного резерву.

Оцінка впливу параметрів резервування на ймовірність відмови системи при комплексному використанні надлишковості. Наведемо деякі результати теоретичного дослідження отриманих в [10] розрахункових формул для показників надійності системи, що дозволяють оцінити ефективність різних методів резервування при сумісному використанні структурної, навантажувальної та часової надлишковості, яка містить поповнювану  $t_d$  і непоповнювану  $t_p$  складові резервного часу.

На рис. 5 та рис. 6 наведено графіки залежності ймовірності відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d) = 1 - P(t_3, t_p, t_d)$  від кратності непоповнюваного резерву часу  $m_l = t_p/t_3$ , які дозволяють кількісно оцінити взаємопов'язаний вплив різних методів резервування на основний показник надійності розглядаємої системи, а також виявити деякі особливості та властивості, властиві системам даного класу. Графіки побудовані для випадку ідеального контролю працездатності елементів структурного резерву.

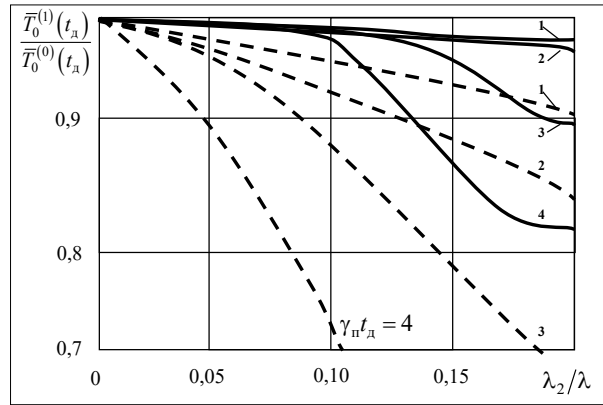


Рис. 3. Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\lambda_2/\lambda$  при  $\lambda_1/\lambda=0,1$ ;  $\lambda/\mu=10^{-2}$ ,  $\alpha=0$  і різних значеннях  $\gamma_{пt_d}$   $m=1$ ; -----  $m=2$  (модель 2)

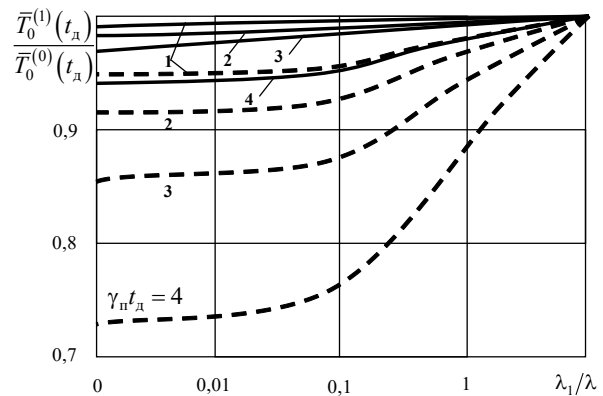


Рис. 4. Графіки залежності відношення  $\bar{T}_0^{(1)}(t_d)/\bar{T}_0^{(0)}(t_d)$  від  $\lambda_1/\lambda$  при  $\lambda_2/\lambda=0,1$ ;  $\lambda/\mu=10^{-2}$ ,  $\alpha=0$  і різних значеннях  $\gamma_{пt_d}$   $m=1$ ; -----  $m=2$  (модель 2)

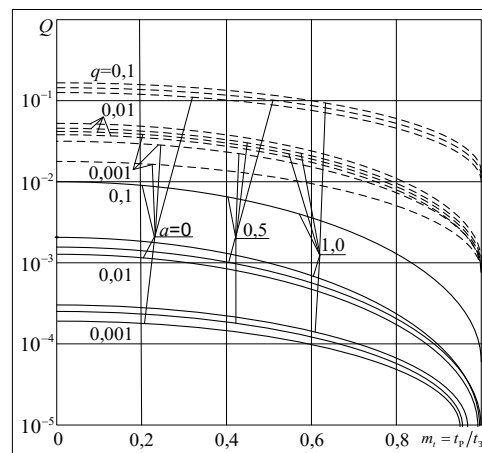


Рис. 5. Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу при різних значеннях ймовірності  $q = \exp(-t_d/t_n)$  і коефіцієнта навантаженості резервних елементів  $\alpha$  і  $n=m=l=1$ ,  $\lambda t_3 = 0,1$ ; -----  $\lambda t_3 = 1,0$

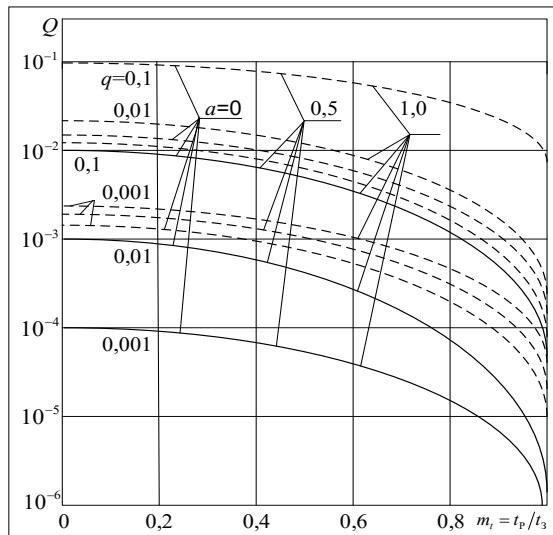


Рис. 6. Графіки залежності і початкові дані ті ж, що і на рис. 5, за виключенням  $m = 2$

З графіків рис. 5 і рис. 6 видно, що на ймовірність відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d)$  помітний вплив чинять всі фактори, що визначають вид і величину досліджуваної надлишковості:

- кратність непоповнюваного резерву часу  $m_i = t_p / t_3$ ;
- ймовірність відмови системи  $q$  при тривалому підключенні резервного елемента замість відмовившого основного, яка залежить від величини поповнюваного резервного часу  $t_d$ ,

$$q = P\{t_n > t_d\} = e^{-t_d / t_n},$$

де  $t_n = 1/\gamma_n$  – математичне очікування часу підключення;

- кількість резервних елементів  $m \geq 1$ ;
- коефіцієнт навантаженості елементів  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Аналізуючи залежності відмови системи  $Q(t_3, t_p, t_d)$  від величини поповнюваного  $q = \exp(-t_d / t_n)$  і непоповнюваного  $m_i = t_p / t_3$  резерву часу, слід відмітити одну важливу особливість. При невеликих значеннях кратності непоповнюваного резерву часу (при  $m \leq 0,8$ ) визначну роль в зменшенні ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$  грає поповнювана складова  $t_d$ . Іншими словами, в області значень  $0 \leq m \leq 0,8$  найбільш ефективним методом підвищення ймовірності безвідмовного функціонування є введення і використання поповнюваного резерву часу, оскільки він чинить максимальний вплив на надійність системи в порівнянні з іншими методами (структурним, навантажувальним резервуванням і збільшенням продуктивності ремонтного органу). Після значень  $m_i = t_p / t_3 \geq 0,8$  суттєвий вплив на величину ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$  починає чинити непоповнювана складова  $t_p$  резервного

часу (рис. 5, рис. 6). В цих умовах після значення  $m_i \approx 0,8$  доцільно зафіксувати поповнювану складову  $t_d$ , а подальшого підвищення надійності досягати збільшенням непоповнюваної складової  $t_p$  резервного часу.

Вказана вище особливість функціонування системи зі знецінюючими відмовами при комплексному урахуванні різних видів надлишковості проявляються при різних значеннях відносної тривалості виконуваного завдання (при  $\lambda t_3 = 0,1$  і  $\lambda t_3 = 1,0$ ) (рис. 5) і при збільшенні числа резервних елементів  $m$  (рис. 6).

Слід відмітити, що збільшення числа резервних елементів з одного до двох при  $\lambda t_3 = 0,1$  дає невелике зниження ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$ . Однак збільшення відносної тривалості виконання завдання  $\lambda t_3$  в 10 раз ( $\lambda t_3 = 1,0$ ) призводить при  $m = 2$  до суттєвого підвищення ефективності структурного резервування – ймовірність відмови системи зменшується приблизно на порядок (рис. 6).

Що стосується навантажувального резервування, то зменшення коефіцієнта навантаженості  $\alpha$  резервних елементів призводить до зменшення ймовірності відмови  $Q(t_3, t_p, t_d)$ , однак вплив цього методу на підвищення надійності системи при  $m = 1$  незначне у порівнянні з іншими методами і помітно посилюється зі збільшенням структурної надлишковості (рис. 6).

Таким чином, проведена в даному розділі кількісна оцінка ефективності різних методів резервування при сумісному урахуванні різних видів надлишковості в системах зі знецінюючими відмовами може слугувати основою при обґрунтуванні рекомендацій щодо підвищення надійності функціонування даного класу систем.

## Список літератури:

1. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних систем і мереж : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. 280 с.
2. K. Raghuvanshi, Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *Discover Applied Sciences*. 2021. № 3 (18). DOI:10.1007/s42452-020-04015-z.
3. Томашевський О.В., Сніжної Г.В. Визначення функції надійності невідновлюваних технічних систем при неповних даних. *Aerospace technic and technology*. 2019. № 8. С. 129–132. DOI: 10.32620/akt.2019.8.19.
4. Ahmada W., Pervez U., Qadirb J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 78. P. 191–215.
5. Jin Y., Hall P., Jiang J., Samaniego F. Estimating Component Reliability Based on Failure Time Data from a System of Unknown Design. *Statistica Sinica*. 2017. № 27. P. 479–499. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202015.0209>.
6. Zhu P., Han J., Guo Y., Lombardi F. Reliability and Criticality Analysis of Communication Networks by Stochastic Computation. *IEEE Network*. 2016. № 30 (6). P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/mnet.2016.1500221nm>.
7. Mogylevych D., Kononova I. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer*. 2019. Vol. 560. P. 101–117. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_5).
8. Могилевич Д.І., Креденцер Б.П., Кононова І.В. Модель надійності систем короткочасної дії з перериванням обслуговування. *Вісник Університету "Україна". Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2021. № 2. DOI: 10.36994/2788-5518-2021-02-02-18.
9. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. *Collection "Information Technology and Security"*. 2022. № 10 (1). P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132>.
10. Креденцер Б.П., Вишнівський В.В., Жердев М.К. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації : монографія. Київ : Фенікс, 2013. 336 с.

### Subach I.Yu., Mogylevych D.I., Uriadov A.V. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REDUNDANCY METHODS IN THE COMPLEX USE OF REDUNDANCY

*The efficiency of modern electronic switching networks is significantly influenced by the reliability of its component subsystems and elements, as well as the complexity of the connections between them.*

*The article presents the results of a theoretical study of reliability models that establish a link between the reliability indicators of electronic communication equipment, the characteristics of failures and their consequences, as well as a set of technical parameters of the object that determine the conditions of its functioning, in which various methods of redundancy (structural, load and time with replenishable and non-replenishable components of reserve time) are jointly implemented.*

*The object of theoretical research is the processes of functioning of electronic communication equipment. The purpose of the study is to analyze the results of the evaluation of the theoretical study of the impact of various factors on the reliability indicators of electronic communication equipment under conditions of their limited reliability. Reliability assessment is determined by the joint consideration in the analyzed analytical models of the factors that affect the reliability of functioning of electronic communication equipment.*

*The analysis made it possible to quantify the effectiveness of various redundancy methods when used together in electronic communication equipment with devaluing failures and taking into account the characteristics of monitoring the performance of redundant elements, as well as to identify some specific features and properties of the obtained analytical relations of reliability indicators of electronic communication equipment.*

**Key words:** reliability, redundancy methods, redundancy, electronic communication equipment, performance monitoring, failures.