

DOI 10.20535/2411-1031.2025.13.1.328966

УДК 621.396.6

ІРИНА КОНОНОВА,
ВІКТОР НЕКРУТЕНКО

МОДЕЛІ МАРШРУТУ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ

Запропоновано аналітичні співвідношення, які встановлюють зв'язок між якістю функціонування маршруту електронної комунікаційної мережі та показниками надійності комунікаційного обладнання. На відміну від попередніх досліджень, де передбачався ідеальний контроль працездатності комунікаційного обладнання, у цій роботі враховано практичні умови експлуатації, за яких контроль здійснюється періодично. Це дозволяє наблизити моделі до реальних умов експлуатації обладнання.

Введено випадковий процес, який характеризує стан обладнання у довільний момент часу, з урахуванням ймовірних переходів між станами працездатності, відмови, контролю та ремонту. Процес є регенеративним, оскільки після завершення контролю або ремонту обладнання повністю відновлює свої експлуатаційні характеристики, і відбувається оновлення моменту проведення наступного контролю.

Отримано аналітичний вираз для коефіцієнта готовності обладнання, що враховує періодичність контролю, тривалість перевірок та характеристики надійності обладнання. Проведено аналіз цієї функції, встановлено умови існування її екстремумів та визначено інтервал між перевітками для досягнення максимального рівня готовності системи.

Крім того, визначено формулу для ймовірності своєчасної доставки повідомлень у електронній комунікаційній мережі, що враховує допустимий час доставки пакетів та характеристики контролю працездатності обладнання.

Отримані результати сприяють обґрунтованому вибору параметрів системи контролю стану обладнання, а також можуть бути використані при модернізації та проектуванні електронної комунікаційної мережі.

Ключові слова: комунікаційне обладнання, електронна комунікаційна мережа, контроль обладнання, технічне обслуговування.

Постановка проблеми. У процесі експлуатації електронної комунікаційної мережі (ЕКМ) можуть виникати критичні ситуації, обумовлені як зовнішніми впливами (природні, техногенні, навмисні дії), так і внутрішніми факторами (фізичне старіння, конструктивні особливості, режими експлуатації, якість технічного обслуговування обладнання та інше) [1]–[3]. Внаслідок цього можливі відмови окремих елементів або цілих сегментів мережі, що призводить до структурно-топологічних модифікацій та, як наслідок, до втрати зв'язку між визначеними вузлами ЕКМ. Такі зміни можуть спричинити суттєве погіршення параметрів якості функціонування ЕКМ [4], [5].

Також, сучасні ЕКМ характеризуються високою компонентністю, що включає значну кількість різноманітного обладнання. Навіть за умови високих показників безвідмовності окремих елементів, інтеграція такої кількості обладнання може призводити до помітного зниження показників надійності ЕКМ та деградації показників якості її функціонування.

У сучасних ЕКМ надійність функціонування значною мірою залежить від своєчасного виявлення та усунення відмов обладнання. Традиційно, для спрощення математичного моделювання, припускається ідеальний контроль працездатності мережевого обладнання. Однак, в реальних умовах експлуатації, переважно застосовується періодичний контроль. Але

при цьому можуть виникнути приховані відмови, що ускладнює оцінку показників надійності та якості функціонування ЕКМ, таких як ймовірність своєчасної доставки повідомлень та коефіцієнт готовності обладнання. Існуючі моделі не враховують впливу періодичності та тривалості контролю на ці показники, що обмежує їхню застосовність у практичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених функціонуванню ЕКМ, значна увага приділяється оцінюванню їх надійності та ефективності в умовах реального функціонування [6]–[8]. Також привертає значну увагу дослідників питання оптимізації топології, маршрутизації, резервування ресурсів та методам оцінювання працездатності комунікаційного обладнання. Відповідні підходи висвітлені у працях [9]–[11], де розглядаються класичні моделі відмовостійкості.

У працях [12]–[15] розглядаються стохастичні моделі, що враховують випадковий характер відмов, відновлення, а також вплив структурних змін мережі. Зазвичай такі моделі базуються на безперервних або дискретних марківських процесах, системах масового обслуговування, які дозволяють оцінювати ймовірнісні характеристики часу доставки повідомлень.

У [16] проведено моделювання та аналіз надійності цифрових мережевих систем в умовах деградації мереж зв'язку. Підкреслена важливість врахування деградації мережі при оцінці надійності систем, що дозволяє більш точно прогнозувати їх поведінку в реальних умовах експлуатації.

У [17] розроблено вдосконалений метод оцінки надійності об'єктів з варіативною структурою, який враховує накопичення прихованих дефектів. Цей підхід дозволяє більш точно оцінити параметри потоку відмов, що виникають через приховані дефекти, які проявляються лише під час технічного обслуговування або зміни режимів роботи.

Водночас недостатньо дослідженим залишається вплив параметрів процесу контролю працездатності обладнання на показники якості функціонування мережі

Формулювання цілей статті. Метою статті є побудова моделей маршруту електронної комунікаційної мережі з урахуванням параметрів контролю стану обладнання. Це дозволить більш точно оцінювати показники надійності та своєчасності доставки повідомлень, враховуючи реальні умови функціонування обладнання. Такий підхід забезпечить підвищення достовірності прогнозування працездатності обладнання, сприятиме оптимізації систем контролю та резервування, а також стане основою для прийняття обґрунтованих рішень під час модернізації та проектування електронних комунікаційних мереж.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У [18] наведено розрахункові співвідношення для ймовірності своєчасної доставки повідомлень у мережі зв'язку з урахуванням реальної надійності обладнання. При цьому, для спрощення математичного опису, було прийнято припущення про ідеальний (безперервний) контроль працездатності мережевого обладнання мережі. Водночас, з огляду на практичні умови експлуатації, у більшості випадків застосовується саме періодичний контроль. Тому в подальших дослідженнях знято зазначене припущення, і отримано нові результати з урахуванням реалізації періодичного контролю працездатності обладнання, що дозволяє наблизити моделі до реальних умов функціонування електронних комунікаційних мереж.

Збережемо постановку завдання дослідження, що наведена в [18], але будемо вважати, що відмови обладнання мережі самостійно проявлятися не можуть і для їхнього виявлення працездатність обладнання мережі контролюється з періодичністю $T_k = \text{const}$, при цьому тривалість контролю t_k – випадкова величина з довільною ФР $G_k(t) = P\{t_k < t\}$.

Сформулюємо завдання і наведемо розрахункові співвідношення для коефіцієнта готовності мережі [19].

Нехай у момент $t = 0$, коли мережа зв'язку починає функціонувати, призначається

проведення контролю через час T_k . За умови, що до заданого часу T_k відмова обладнання не відбулася ($t_{oc} > T_k$, де $t_{oc} = 1/\lambda_c$ – напрацювання до відмови, λ_c – сумарна інтенсивність відмов обладнання маршруту), розпочинається процедура контролю, тривалість якої величина t_k з функцією розподілу $G_k(t)$.

У випадку, якщо до заданого моменту часу T_k ($t_{oc} < T_k$) виникає відмова, виконується ремонт зі середньою тривалістю $\bar{t}_{вс}$ ($\bar{t}_{вс} > \bar{t}_k$), що відновлює працездатність КО. Варто підкреслити, що з моменту появи відмови до початку ремонтних робіт КО перебуває у стані прихованої відмови.

Передбачається, що після завершення контролю працездатності або ремонтних робіт КО повністю відновлює свої початкові експлуатаційні характеристики. Після цього відбувається оновлення моменту проведення чергової перевірки стану. Таким чином, функціонування обладнання розглядається як циклічний процес, що включає чергування фаз нормальної роботи, контролю, можливої відмови та ремонту.

У межах такого підходу постає задача визначення такої періодичності контролю, яка дозволяє досягти найвищого можливого значення коефіцієнта готовності КО. Для розв'язання цієї задачі вводиться випадковий процес $x(t)$, що описує динаміку зміни стану КО у довільний момент часу t , відображаючи ймовірні переходи між станами працездатності, відмови, контролю та ремонту. На рис. 1 зображено граф станів випадкового процесу $x(t)$ та переходів між ними.

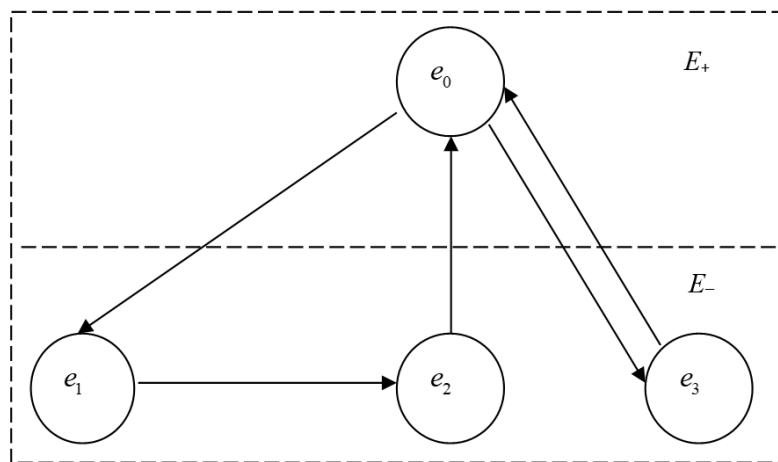


Рисунок 1 – Граф станів випадкового процесу $x(t)$

де e_0 – стан функціонування обладнання у справному режимі (працездатне обладнання);
 e_1 – стан, у якому об'єкт непрацездатний, але відмова ще не виявлена (стан прихованої відмови);
 e_2 – стан, у якому виконується ремонт обладнання після виявлення відмови;
 e_3 – стан, у якому проводиться контроль технічної справності обладнання;
 $E_+ = \{e_0\}$ та $E_- = \{e_1, e_2, e_3\}$ – підмножини, що відповідають справному та непрацездатному станам обладнання.

Важливо зазначити, що процес $x(t)$ є регенеративним, оскільки в моменти завершення контролю технічної справності і ремонту (моменти часу t_k ($k = 0, 1, 2, \dots$)) переходу в

стан e_0) подальший розвиток процесу $x(t)$ не залежить від минулого. Це обумовлено тим, що в зазначені моменти часу обладнання мережі повністю відновлює свою працездатність та оновлюється момент проведення чергової перевірки стану (наступного контролю). Моменти t_k є моментами регенерації процесу $x(t)$, а послідовність інтервалів часу $\tilde{X}_k = t_k - t_{k-1}$ ($k = 1, 2, \dots$) між цими моментами формує рекурентний процес відновлення. При цьому величини $\tilde{X}_k$ представляють собою послідовність однаково розподілених, доданих та взаємно незалежних випадкових величин. Таким чином, коефіцієнт готовності обладнання мережі зв'язку $K_r(T_k)$ визначається як [20]:

$$K_r(T_k) = MX^{(0)} / M\tilde{X}, \quad (1)$$

де $MX^{(0)}$ – середній час знаходження процесу $x(t)$ в стані функціонування обладнання у справному режимі;

$M\tilde{X}$ – середня тривалість інтервалів часу між моментами регенерації.

Середній час $MX^{(0)}$ розраховується як математичне очікування від мінімальної з двох випадкових величин – часу напрацювання обладнання до відмови t_{oc} та періодичності контролю відповідно до виразу [20]:

$$MX^{(0)} = M[\min(t_{oc}, T_k)] = \int_0^{T_k} e^{-\lambda_c t} dt = \frac{1}{\lambda_c} (1 - e^{-\lambda_c T_k}). \quad (2)$$

Для обчислення середньої тривалості інтервалу між моментами регенерації використовується формула повного математичного очікування [20]:

$$M\tilde{X} = T_k + \bar{t}_{bc} P\{t_{oc} \leq T_k\} + \bar{t}_k P\{t_{oc} > T_k\} = T_k + \bar{t}_k + (\bar{t}_{bc} - \bar{t}_k)(1 - e^{-\lambda_c T_k}). \quad (3)$$

Після підстановки формул (2) й (3) в (1), отримано аналітичну залежність для коефіцієнта готовності $K_r(T_k)$:

$$K_r(T_k) = \frac{(1/\lambda_c)(1 - e^{-\lambda_c T_k})}{T_k + \bar{t}_k + (\bar{t}_{bc} - \bar{t}_k)(1 - e^{-\lambda_c T_k})}. \quad (4)$$

Здійснивши диференціювання виразу (4) за T_k та прирівнявши похідну до нуля, в результаті алгебраїчних перетворень отримуємо наступне рівняння:

$$\bar{t}_k = \frac{1}{\lambda_c} (e^{\lambda_c T_k} - 1) - T_k. \quad (5)$$

Рівняння (5) визначає необхідну умову наявності екстремуму функції $K_r(T_k)$. Його розв'язок визначає точки локальних екстремумів, серед яких обирається точка абсолютного максимуму $T_k = T_k^*$. Оскільки величина T_k^* задовольняє умову (5), то максимальне значення коефіцієнта готовності можна обчислити за виразом:

$$K_r(T_k^*) = \frac{1}{e^{\lambda_c T_k^*} + \lambda_c (\bar{t}_{bc} - \bar{t}_k)}. \quad (6)$$

Рівняння (5) має щонайменше один корінь, а абсолютного максимуму показник $K_r(T_k)$ досягає на кінцевій точці (що відповідає достатній умові існування екстремуму функції $K_r(T_k)$). Припустимо, що $\bar{t}_{bc} > \bar{t}_k$, $\lambda_c \bar{t}_{bc} \ll 1$ і позначимо через $W(T_k)$ частину рівняння (5). Легко переконатися, що за умови $T_k = 0$ значення $W(0) = 0$ та виконується нерівність:

$$\bar{t}_k \geq W(0). \quad (7)$$

Нехай $T_k \rightarrow \infty$. У цьому випадку $\lim_{T_k \rightarrow \infty} W(T_k) = \infty$ і при цьому виконується нерівність:

$$\bar{t}_k < \lim_{T_k \rightarrow \infty} W(T_k), \quad (8)$$

що відповідає достатній умові існування екстремуму функції $K_r(T_k)$.

Отже, здійснення необхідної (5) і достатньої (8) умов наявності екстремуму функції $K_r(T_k)$ гарантує, що рівняння (5) завжди має принаймні один корінь, а функція (4) досягає абсолютного максимуму в кінцевій точці $T_k^* < \infty$.

Тепер сформулюємо розрахункові залежності для ймовірності своєчасної доставки повідомлення [18], що враховують допустимий час t_d , характеристики контролю (періодичність та тривалість) і обмежену надійність обладнання. Цей показник визначається таким чином [18]:

$$P_{\text{св}}(t_d) = P_1 P_2(t_d) P_3, \quad (9)$$

де P_1 – ймовірність застати обладнання маршруту мережі в працездатному стані у довільний момент часу в сталому режимі;

P_2 – ймовірністю того, що сумарний час доставки повідомлення абоненту не буде перевищувати допустимої величини t_d ;

P_3 – ймовірність того, що при надходженні в електронну комунікаційну мережу заявка не отримає відмову в обслуговуванні у жодній з фаз обслуговування.

Ймовірність P_1 визначається формулою (6), а оптимальна періодичність контролю T_k^* розраховується шляхом розв'язання рівняння (5).

Підставляючи вираз для $K_r(T_k^*)$, $P_2(t_d)$, P_3 у формулу (9), отримуємо розрахункове співвідношення для ймовірності своєчасної доставки повідомлень $P_{\text{св}}(t_d, T_k^*)$ при періодичному контролі працездатності її обладнання:

$$P_{\text{св}}(t_d, T_k^*) = \frac{P_2(t_d) P_3}{e^{\lambda_c T_k^*} + \lambda_c (\bar{t}_{\text{вс}} - \bar{t}_k)},$$

де $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i$;

$$\bar{t}_{\text{вс}} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\lambda_c} \bar{t}_{\text{в}i};$$

T_k^* – оптимальна періодичність контролю працездатності мережі зв'язку, що визначається шляхом розв'язання рівняння (5).

Висновки. Таким чином, отримані вирази для кількісної оцінки ймовірності своєчасної доставки повідомлень, що враховують показники надійності обладнання та характеристики контролю (періодичність і тривалість) її працездатності, а також резерв часу, який був використаний при обслуговуванні повідомлення, дають змогу більш точно моделювати реальні умови функціонування електронної комунікаційної мережі. Це, у свою чергу, дозволяє підвищити достовірність оцінювання їхньої ефективності, а також обґрунтовано підходити до вибору параметрів системи контролю та резервування обладнання.

Перспективи подальших досліджень. У рамках подальших досліджень доцільно визначити компроміс між ресурсними витратами на реалізацію процедур контролю

обладнання та досягнутими покращеннями у показниках надійності й своєчасності доставки повідомлень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] “Boeing оновив прошивку літаків 737 Max. Але заборону на них поки не зняли”, *BBC news*, 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-48306072>. Дата звернення: Квіт. 5, 2025.
- [2] B. Schroeder, and E. Pinheiro, “DRAM errors in the wild: A large-scale field study”, *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 37, iss. 1, pp. 193-204, 2009, doi: <https://doi.org/10.1145/2492101.155537>.
- [3] ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. [Чинний від 01.01.97], Вид. офіц. Київ: Дерстандарт, 1994.
- [4] K.S. Trivedi, *Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications*, book. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119285441>.
- [5] J.P.G. Sterbenz et al., “Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines”, *Computer Networks*, vol. 54, iss. 8, pp. 1245-1265, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>.
- [6] А.Б. Фещенко, О.В. Закора, та Л.В. Борисова, “Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС”, *Problems of Emergency Situations*, № 1 (35), с. 120-132, 2022, doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9.
- [7] M.T. Todinov, *Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks*. Oxford, UK: Oxford Brookes University, 2013.
- [8] О.С. Єременко, та А. Мерснї, “Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням”, *Проблеми телекомунікацій*, № 2 (27), с. 68-81, 2020, doi: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>.
- [9] Н. Князева, та О. Нєнов, “Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання”, *Вісник Університету “Україна” Серія Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*, № 2 (23), с. 194-210, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://visn-it.uu.edu.ua/index.php/visnicct/article/view/54>. Дата звернення: Квіт. 11, 2025.
- [10] Y. Kim., K. Song, H. Pham, and I. Chang, “A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time”, *Symmetry*, vol. 14, iss. 2, pp. 1-22, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/sym14020343>.
- [11] K. Raghuvanshi, A. Agarwal, and K. Jain, “A time-variant fault detection software reliability model”, *SN Appl. Sci.* vol. 3 (18), 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.
- [12] О.М. Васілевський, та О.Г. Ігнатенко, *Нормування показників надійності технічних засобів: навч. пос.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013.
- [13] F. Bistouni, and M. Jahanshahi, “Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 75, pp. 168-183, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2014.08.005>.
- [14] W.Ahmed, O.Hasan, U.Pervez and J. Qadir, “Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 78, pp. 191-215, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>.

- [15] S. Maza, “Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 228 (3), pp. 243-253, 2014, doi: 10.1177/1748006X14525772.
- [16] H. Mo, and M. Xie, “Modeling and Reliability Analysis of Digital Networked Systems Subject to Degraded Communication Networks”, *Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer*, vol. 365, pp. 296-314, 2015, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19216-1_28.
- [17] О.С. Бабій, Л.М. Сакович, О.О. Слюсарчук, Ю.М. Єлісов та Я.Е. Курята, “Удосконалений метод оцінювання надійності об’єктів зі змінною структурою”, *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*, № 2, с. 6-14, 2024, doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-1>.
- [18] В.І. Некрутенко, та І.В. Кононова, “Модель шляху інформаційного напрямку мережі зв’язку спеціального призначення з реальною надійністю обладнання”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 35 (74), № 4, с. 27-32, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/05>.
- [19] Б.П. Креденцер, В.В. Вишнівський, та Д.І. Могилевич, *Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія*. Київ, Україна: “Фенікс”, 2013.
- [20] Б.П. Креденцер, О.П. Волох, та В.І. Кривцун, “Оптимізація періодичності контролю технічного стану пристроїв військового призначення за відсутністю самостійного прояву відмов”, *Зб. наук. пр. ВІ КНУ ім. Тараса Шевченка*, № 2, с. 77-82, 2016. [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/znp_vi_knu/znp_vi_knu_2006_02.pdf. Дата звернення: Квіт. 9, 2025.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2025.

REFERENCE

- [1] “Boeing has updated the firmware of 737 Max aircraft. But the ban on them has not yet been lifted”, *BBC news*, 2019. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-48306072>. Accessed on: Apr. 5, 2025.
- [2] B. Schroeder, and E. Pinheiro, “DRAM errors in the wild: A large-scale field study”, *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 37, iss. 1, pp. 193-204, 2009, doi: <https://doi.org/10.1145/2492101.155537>.
- [3] *DSTU 2861-94. Reliability of equipment. Reliability analysis. Main provisions*. [Effective from 01.01.97]. Published by the official. Kyiv: Derstandart, 1994.
- [4] K.S. Trivedi, *Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications, book*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119285441>.
- [5] J.P.G. Sterbenz et al., “Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines”, *Computer Networks*, vol. 54, iss. 8, pp. 1245-1265, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>.
- [6] A. Feshchenko, O. Zakora, and L. Borisova, “Improvement of the probabilistic model of a typical fragment of the departmental digital telecommunication network of the SES”, *Problems of Emergency Situations*, no. 1 (35), pp. 120-132, 2022. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-9>.
- [7] M.T. Todinov, *Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks*. Oxford, UK:

- Oxford Brookes University, 2013.
- [8] O.S. Eremenko, and A. Mersni, “Increasing the fault tolerance of elements of modern infocommunication networks using default gateway redundancy protocols”, *Problems of Telecommunications*, no. 2 (27), pp. 68-81, 2020, doi: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>.
 - [9] N. Knyazeva, and O. Nenov, “Assessment of Structural Reliability of Telecommunication Networks of Uncertain Topology Based on Simulation Modeling”, *Bulletin of the University of “Ukraine” Series Informatics, Computer Science and Cybernetics*, no. 2 (23), pp. 194-210, 2021. [Online]. Available: <https://visn-it.uu.edu.ua/index.php/visnicct/article/view/54>. Accessed on: Apr. 11, 2025.
 - [10] Y. Kim., K. Song, H. Pham, and I. Chang, “A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time”, *Symmetry*, vol. 14, iss. 2, pp. 1-22, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/sym14020343>.
 - [11] K. Raghuvanshi, A. Agarwal, and K. Jain, “A time-variant fault detection software reliability model”, *SN Appl. Sci.* vol. 3 (18), 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>.
 - [12] O.M. Vasilevsky, and O.G. Ignatenko, *Normalization of reliability indicators of technical means: a tutorial*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2013.
 - [13] F. Bistouni, and M. Jahanshahi, “Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 75, pp. 168-183, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2014.08.005>.
 - [14] W.Ahmed, O.Hasan, U.Pervez and J. Qadir, “Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks”, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 78, pp. 191-215, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>.
 - [15] S. Maza, “Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 228 (3), pp. 243-253, 2014, doi: 10.1177/1748006X14525772.
 - [16] H. Mo, and M. Xie, “Modeling and Reliability Analysis of Digital Networked Systems Subject to Degraded Communication Networks”, *Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer*, vol. 365, pp. 296-314, 2015, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19216-1_28.
 - [17] O. Babiy, L. Sakovych, O. Slyusarchuk, Y. Elisov, and Y. Kuryata, “Improved methodology for assessing the reliability of objects with a variable structure”, *Radioelectronics, Informatics, Management*, vol. 2, pp. 6-14, 2024, doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-1>.
 - [18] V.I. Nekrutenko, and I.V. Kononova, “Model of the path of the information direction of a special-purpose communication network with real equipment reliability”, *Vernadsky TSU Scientific Notes. Series: Technical Sciences*, vol. 35 (74), no. 4, pp. 27-32, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/05>.
 - [19] B.P. Kredentser, V.V. Vyshnivskyi, and D.I. Mogilevich, *Reliability assessment of redundant systems with limited initial information: monograph*. Kyiv, Ukraine: “Phoenix”, 2013.
 - [20] B.P. Kredentser, O.P. Volokh, and V.I. Kryvtun, “Optimization of the frequency of monitoring the technical condition of military devices in the absence of independent manifestation of failures,” Coll. of Scien. Works of the Mil. Inst. of Kyiv Nat. Taras Shevchenko Un., no. 2, pp. 77-82, 2016. [Online]. Available: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/zn_p_vi_knu/zn_p_vi_knu_2006_02.pdf. Accessed on: Apr. 9, 2025.

IRYNA KONONOVA,
VIKTOR NEKRUTENKO

MODEL OF THE ROUTE OF THE ELECTRONIC COMMUNICATION NETWORK, TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF EQUIPMENT CONDITION MONITORING

Analytical relationships are proposed that establish a link between the quality of the electronic communication network route and the reliability indicators of communication equipment. In contrast to previous studies, which assumed perfect control of the performance of communication equipment, this paper takes into account practical operating conditions under which control is carried out periodically. This makes it possible to bring the models closer to the actual operating conditions of the equipment.

A random process is introduced that characterizes the state of the equipment at an arbitrary point in time, taking into account the probable transitions between the states of operability, failure, control, and repair. The process is regenerative, since after the completion of inspection or repair, the equipment fully restores its operational characteristics, and the moment of the next inspection is updated.

An analytical expression for the equipment availability factor is obtained, which takes into account the frequency of control, the duration of inspections, and the reliability characteristics of the equipment. An analysis of this function is carried out, the conditions for the existence of its extremes are established, and the interval between inspections is determined to achieve the maximum level of system availability.

In addition, a formula for the probability of timely delivery of messages in an electronic communication network is determined, taking into account the allowable time of packet delivery and the characteristics of equipment performance monitoring.

The obtained results contribute to a reasonable choice of parameters of the equipment condition monitoring system and can also be used in the modernization and design of an electronic communication network.

Keywords: communication equipment, electronic communication network, equipment control, maintenance.

Кононова Ірина Віталіївна, к.т.н., доцент, завідувач Спеціальної кафедри № 4, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0001-6945-0323, viti21@ukr.net.

Некрутенко Віктор Ілліч, аспірант, заступник завідувача Спеціальної кафедри № 2, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0009-0001-2843-7824, nvi200367@gmail.com.

Kononova Iryna, candidate of technical sciences, associate professor, chair of the No. 4 special academic department, Institute of special communication and information protection at the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Nekrutenko Viktor, post graduate student, deputy chair of the No. 2 special academic department, Institute of special communication and information protection at the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.