

## СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБТ

УДК 654.1-192

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.50-57>Д.І. Могилевич<sup>1</sup>, І.В. Кононова<sup>2</sup>, О.К. Климович<sup>3</sup>, В.Д. Могилевич<sup>4</sup><sup>1</sup>Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України<sup>2</sup>Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ<sup>3</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів<sup>4</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

### МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Ефективність функціонування телекомунікаційних систем, які належать до класу складних технічних систем, залежить від надійності її підсистем та елементів, а також від складності зв'язків між ними. Метою статті є обґрунтування загального підходу до комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання телекомунікаційної мережі зі звідною структурою з розробкою методики розрахунку показників надійності обладнання.

У статті представлено формалізований опис наукової проблеми та запропоновано загальний підхід її вирішення, який базується на використанні принципу декомпозиції, що дозволяє поетапно проводити оцінку надійності телекомунікаційної мережі на трьох взаємопов'язаних рівнях: перший етап – на рівні окремих елементів обладнання (таких типових пристроїв, як маршрутизатори, комутатори, сервери, робочі станції, обладнання для шифрування IP тощо), в яких різні типи резервування можуть бути надані окремо або спільно: структурні, навантажувальні, часові; другий етап – на рівні телекомунікаційного обладнання інформаційних шляхів; третій етап – на рівні телекомунікаційного обладнання інформаційних напрямків.

Запропоновано методику комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання комунікаційних мереж зі звідною структурою з урахуванням сукупності факторів, деякі з яких є агресивними та призводять до зниження надійності (збої, що спричиняють короточасні перебої в роботі; стійкі несправності обладнання, які необхідно відновити до справності несправних пристроїв в ремонтному органі; недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу), та інші – підтримують нормальне функціонування телекомунікаційного обладнання на даному рівні (використовуючи окремо або спільно різні типи надмірності).

**Ключові слова:** надійність, телекомунікаційне обладнання, відмови, збої, резервування.

#### Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Глибока зміна в техніці зв'язку і обчислювальної техніки в останні десятиліття привели до інтеграції мереж зв'язку та комп'ютерних мереж, що зробило можливим створення складної інформаційної мережі і розробку глобальної інформаційної структури [1–3]. Не викликає сумніву той факт, що на ефективність функціонування такої великої системи істотний вплив чинитиме надійність складових її підсистем і елементів, а також складність зв'язків між ними. Незважаючи на постійні вдосконалення технологій виробництва високонадійних елементів, вузлів і блоків, а також методів їх збирання та відладки на рівні підсистем і комплексів, все ж зростання складності сучасних та перспективних систем не завжди дозволяє забезпечити задану надійність їх функціонування.

Разом з тим аналіз ряду публікацій вітчизняних і зарубіжних фахівців свідчить про зниження уваги до питань дослідження надійності функціонування телекомунікаційного обладнання (ТЛКО) систем і мереж зв'язку [4–13]. Відомі в цій предметній сфері наукові результати присвячені в основному дослідженням різних приватних аспектів надійності ТЛКО і отримані, як правило, без комплексного урахування сукупності факторів, що впливають на надійність. Одні з цих чинників є агресивними і призводять до зниження надійності (збої, що викликають короточасні перерви у функціонуванні; стійкі відмови обладнання, які вимагають відновлення працездатності пристроїв, що відмовили в ремонтному органі; недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу), а інші – підтримують нормальне функціонування ТЛКО на заданому рівні (використання окремо або спільно різних видів резер-

вування – структурного, часового, навантажувального, а також підвищення продуктивності ремонтного органу, що призводить до підвищення ефективності використання надлишковості).

Ця обставина призвела до того, що до теперішнього часу відсутня єдина методологія і ефективний науково-методичний апарат (методи, моделі, методики) для оцінки надійності ТЛКО і прийняття науково обґрунтованих рекомендацій в її забезпеченні при модернізації існуючих та побудові перспективних мереж зв'язку.

**Метою статті** є обґрунтування загального підходу до комплексної оцінки надійності ТЛКО мереж зв'язку зі звідною структурою з розробкою методики розрахунку показників надійності обладнання на різних рівнях структури: на рівні окремих типових пристроїв (комутатори, маршрутизатори, сервера і т.д.), а також на рівнях структури ТЛКО окремих інформаційних маршрутів (шляхів) та окремих напрямків зв'язку.

### Виклад основного матеріалу

Визначимо деякі поняття, які використовуються в даній статті. Комплексність оцінки надійності ТЛКО означає можливість спільного урахування в запропонованих математичних моделях основних, які найбільш суттєво впливають на надійність обладнання, факторів: збоїв, відмов, різних методів резервування (структурного, навантажувального, часового), продуктивності ремонтного органу, а також можливість побудови моделей надійності при довільних законах розподілу деяких вихідних випадкових величин (часу поточного ремонту, тривалості підключення структурного резерву, часу існування збоїв та усунення їх наслідків) [14].

До ТЛКО мереж зв'язку зі звідною структурою будемо відносити обладнання, що має досить складну структурну схему надійності, яка може бути зведена до одного еквівалентного елемента за допомогою регулярної процедури заміни всіх окремих послідовних і паралельних ділянок схеми еквівалентними елементами з розрахунком для них відповідних показників надійності. Показники надійності, отримані в результаті такого перетворення одиночного еквівалентного елемента, приймаються в якості показників надійності ТЛКО з вихідної складною структурою [15].

### Формалізована постановка задачі

Структура мережі зв'язку, як складної, просто-ротно рознесеної системи, може бути представлена у вигляді графа  $G(N, M)$ , де  $N\{n_i\}$  – множина вершин (маршрутизатори, комутаційні центри),  $M\{m_{ij}\}$  – множина ребер. Шлях  $\pi = n_1^0 \cap n_2^\tau \cap n_3^\tau, \dots, \cap n_{k-1}^\tau \cap n_k^0$ , де  $n_1^0, n_k^0 \in N^0$ ;

$n_2^\tau, n_3^\tau, \dots, n_{k-1}^\tau \in N^\tau$ ;  $n^0$  – кінцевий маршрутизатор,  $n^\tau$  – транзитний маршрутизатор. Напрямок зв'язку  $n_1^0(\pi_1) = n_1^0(\pi_2) = \dots = n_1^0(\pi_k)$  і  $n_k^0(\pi_1) = n_k^0(\pi_2) = \dots = n_k^0(\pi_k)$ , тобто всі шляхи одного напрямку зв'язку містять одні й ті ж ( $n_1^0$  та  $n_k^0$ ) кінцеві маршрутизатори.

Шлях  $\pi_1$  і  $\pi_2$  одного напрямку зв'язку є незалежним, якщо  $n_i^\tau(\pi_1) \notin N^\tau(\pi_2)$ , а  $n_i^\tau(\pi_2) \notin N^\tau(\pi_1)$ , тобто шляхи одного напрямку зв'язку не містять одні й ті ж транзитні маршрутизатори.

Нехай відомі (або задані) експлуатаційно-технічні характеристики ТЛКО, що входить до складу інформаційних шляхів і напрямків зв'язку: безвідмовності  $\Pi^{(B)} = \{\lambda, \lambda_3, \bar{t}_3, \sigma_3\}$ ; ремонтпридатності  $\Pi^{(B)} = \{\bar{t}_B, \sigma_B, l\}$ ; надлишковості  $\Pi^{(H)} = \{m, \alpha, \bar{t}_\Pi, \sigma_3, t_d\}$ , де  $\lambda, \lambda_3$  – відповідно інтенсивність стійких відмов і збоїв;  $\bar{t}_3, \sigma_3$  – середнє значення і дисперсія часу існування збою і його наслідків;  $\bar{t}_B, \sigma_B$  – середнє значення і дисперсія часу відновлення пристрою, що відмовив;  $l$  – кількість бригад у ремонтному органі;  $m$  – число резервних пристроїв;  $\alpha$  – ступінь навантаженості пристроїв структурного резерву ( $\alpha = 0$  – ненавантажений або  $\alpha = 1$  навантажений резерв);  $\bar{t}_\Pi, \sigma_\Pi$  – середнє значення і дисперсія часу підключення резервного пристрою;  $t_d$  – допустимий час підключення (величина резерву часу).

Необхідно розробити математичні моделі надійності, тобто аналітичні залежності, які встановлюють зв'язок між показниками надійності ТЛКО мережі зв'язку, характеристиками надійності елементів його структури і параметрами процесу функціонування:

середнього напрацювання на відмову

$$T_0(t_d) = f_1(\Pi^{(B)}, \Pi^{(B)}, \Pi^{(H)});$$

ймовірності безвідмовного функціонування

$$P(t, t_d) = f_2(\Pi^{(B)}, \Pi^{(B)}, \Pi^{(H)});$$

середній час відновлення

$$T_B(t_d) = f_3(\Pi^{(B)}, \Pi^{(B)}, \Pi^{(H)});$$

коефіцієнт готовності

$$K_T(t_d) = f_4(\Pi^{(B)}, \Pi^{(B)}, \Pi^{(H)});$$

коефіцієнт оперативної готовності

$$P_{or}(t, t_d) = f_5(\Pi^{(B)}, \Pi^{(B)}, \Pi^{(H)}).$$

**Обмеження і допущення:** розглядається ТЛКО, структурна схема надійності якого може бути представлена у вигляді звідної структури; функціонування окремих шляхів та напрямків зв'язку здійснюється незалежно; час ремонту елементів, що

відмовили значно менше середнього напрацювання на відмову; в ремонтному органі здійснюється повне відновлення працездатності елементів, які відмовили.

**Загальний підхід до вирішення задачі.** В основі цього підходу лежить принцип декомпозиції, практична реалізація якого при дослідженні надійності ТЛКО мереж зв'язку стала можливою завдяки наявності важливої особливості цього класу складних систем – можливості розбиття ієрархії структури на кінцеве число взаємозалежних підсистем, а кожної підсистеми – на кінцеве число більш простих підсистем і т.д. Формалізація дослідження сформованої науково-технічної задачі призвела до необхідності «вертикальної» і «горизонтальної» декомпозиції цього процесу [8, 16].

Аналіз показав, що при «вертикальній» декомпозиції доцільно в якості підсистем структури мережі вибирати сукупність технічних засобів ТЛКО, які утворюють інформаційні напрямки зв'язку. Декомпозицію в «горизонталі» доцільно проводити поетапно на трьох взаємопов'язаних рівнях:

перший етап – на рівні окремих елементів обладнання (таких типових пристроїв, як маршрутизатори, комутатори, сервера, робочі станції, апаратура ІР-шифрування і т.д.), в яких можуть бути передба-

чені окремо або спільно різні види резервування: структурного, навантажувального, часового;

другий етап – на рівні ТЛКО інформаційних шляхів (маршрутів), кожен з яких складається із сукупності різних елементів обладнання, певним чином пов'язаних між собою;

третій етап – на рівні ТЛКО інформаційних напрямків, які являють собою сукупність обладнання різних шляхів.

Доцільність такого підходу обумовлена тим, що він дозволяє проводити аналіз надійності ТЛКО з різним ступенем деталізації і глибиною на кожному етапі дослідження.

**Методика рішення задачі.** Це методика призначена для комплексної оцінки надійності ТЛКО мереж зв'язку (окремих типових пристроїв, а також сукупність таких пристроїв, пов'язаних між собою певним чином, і утворюють ТЛКО шляхів і напрямків зв'язку) з урахуванням збоїв, стійких відмов і різних видів резервування, які використовуються як окремо, так і спільно. В її основу покладено вказаний вище загальний підхід до вирішення задачі, формалізована постановка якої, вихідні дані, обмеження і допущення наведені раніше.

Методика включає в себе сукупність взаємопов'язаних етапів, послідовне виконання яких призводить до досягнення поставленої мети (рис. 1).

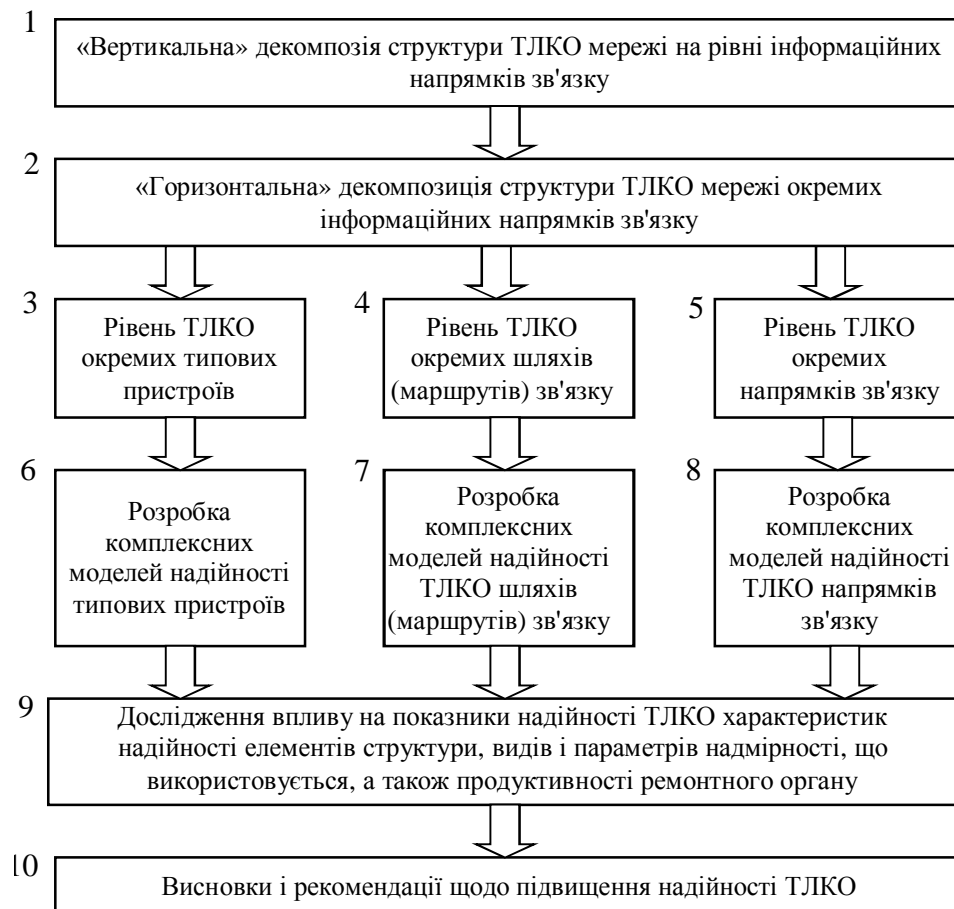


Рис. 1. Укрупнена структурна схема методики комплексної оцінки надійності ТЛКО мереж зв'язку

Розглянемо основні етапи запропонованої методики. Будемо вважати, що в результаті виконання операцій першого етапу («вертикальна» декомпозиція) отримана сукупність взаємозалежних підсистем, кожна з яких містить ТЛКО напрямків зв'язку (рішення цього питання не входить в завдання цієї статті). Наведемо результати, отримані при виконанні наступних етапів методики.

*Рівень окремих типових пристроїв ТЛКО.* Розглянемо комплект ТЛКО, в якому передбачено спільне використання структурного, навантажувального та тимчасового резервування і який в подальшому будемо називати системою. Нехай в загальному випадку система складається з  $n$  основних (робочих) ( $n \geq 1$ ) і  $m$  резервних ( $m \geq 1$ ) елементів, які для спрощення будемо вважати ідентичними. В системі разом зі структурним і часовим резервуванням може використовуватися навантажувальне резервування, при цьому елементи структурного резерву знаходяться в ненавантаженому режимі.

У кожному основному елементі поряд зі стійкими відмовами (інтенсивність  $\lambda$ ) можуть виникати збої з інтенсивністю  $\lambda_3$ , стимулюючи підключення одного з працездатних резервних елементів в основний (робочий) режим. Позначимо через  $\lambda_i^{(3)}$  сумарну інтенсивність відмов і збоїв, а через  $\lambda_i$  – сумарну інтенсивність відмов за умови, що в даний момент непрацездатні  $i$  елементів. Значення  $\lambda_i$  визначається числом основних і резервних елементів, а також інтенсивністю відмов окремого резервного і інтенсивністю відмов і збоїв основного елементів, тобто

$$\lambda_i^{(3)} = n(\lambda + \lambda_3) + (m-i)\alpha\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m; \quad (1)$$

$$\lambda_i = [n + (m-i)\alpha]\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

При  $\alpha = 0$  отримаємо ненавантажений, а при  $\alpha = 1$  – навантажений режим структурного резерву.

При відмові (або збої) одного з основних елементів замість нього підключається один з працездатних резервних елементів тривалість підключення  $t_n$  – випадкова величина з довільною функцією розподілу  $F_n(t) = P\{t_n < t\}$ . В системі передбачено резерв часу – допустимий час підключення  $t_d$ , що встановлює обмеження на тривалість кожного підключення. Ймовірність  $q$  того, що відмова (збій) одного з основних елементів і подальше підключення резерву призведе до відмови (зриву функціонування) системи (за рахунок тривалого підключення  $t_n > t_d$ ), визначається за формулою

$$q = P\{t_n > t_d\} = 1 - F_n(t_d). \quad (3)$$

Ремонт відмовивших елементів (основного або резервного) починається негайно. Ремонтний орган включає в себе  $l$  ( $1 \leq l \leq m+1$ ) ремонтних

бригад з однаковим розподілом тривалості відновлення працездатності  $F_B(t) = P\{t_B < t\}$ . По закінченні ремонту одного з  $m+1$  непрацездатних елементів функціонування системи відновлюється. До прийнятих раніше обмежень і припущень будемо вважати, що  $\bar{t}_B \ll 1/(\lambda + \lambda_3)$ ;  $\bar{t}_n \ll 1/(\lambda + \lambda_3)$ ;  $t_d \ll 1/(\lambda + \lambda_3)$ ;  $\bar{t}_n \ll \bar{t}_B$ ;  $t_d \ll \bar{t}_B$ .

Для прийнятих вихідних умов в роботі [17, 18] отримані розрахункові співвідношення для основних показників надійності (моделі надійності) системи (комплекту ТЛКО типового пристрою), які мають вигляд:

$$T_0(t_d) = \frac{1}{n\lambda} \left[ \frac{x(n\rho)^m}{m!} \prod_{i=1}^m (n+i\alpha) + q(1+k_3) \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$P(t, t_d) = \exp \left[ -n\lambda t \left( \frac{x(n\rho)^m}{m!} \prod_{i=1}^m (n+i\alpha) + q(1+k_3) \right) \right]; \quad (5)$$

$$T_B(t_d) = \frac{1}{q_0} [q_1 T_B^* + q_2 T_n^*(t_d)], \quad (6)$$

де

$$q_0 = q_1 + q_2 = q_1 = \begin{cases} \frac{\beta_m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i + \frac{qn(\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0^{(3)}}, & l = 1, \\ \frac{\beta_1^m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i + \frac{qn(\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0^{(3)}}, & l \geq m; \end{cases} \quad (7)$$

$$T_B^* = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m}, & l = 1, \\ \frac{\beta_1}{m+1}, & l = m+1; \end{cases} \quad x = \begin{cases} \frac{\beta_m}{\beta_1^m}, & l = 1, \\ 1, & l \geq m; \end{cases} \quad (8)$$

$$T_n^*(t_d) = \int_{t_d}^{\infty} \frac{(t-t_d)dF_n(t)}{1-F_n(t_d)} = \frac{1}{1-F_n(t_d)} \int_{t_d}^{\infty} x dF_n(x) - t_d; \quad (9)$$

$\lambda_i$  – формула (2);  $\lambda_0^{(3)}$  – формула (1) при  $i=0$ ;  $q$  – формула (3);  $k_3 = \lambda_3/\lambda$ ;  $\rho = \lambda\bar{t}_B$ ;  $\beta_m = \int_0^{\infty} x^m dF_B(x)$ ;

$$\bar{t}_B = \beta_1; \quad K_r(t_d) = \left[ 1 + \frac{T_B(t_d)}{T_0(t_d)} \right]^{-1}; \quad P_{or}(t, t_d) = K_r(t_d)P(t, t_d). \quad (10)$$

Розглянемо тепер інший типовий комплект ТЛКО, в якому використовується тільки часове резервування (структурний резерв відсутній). Для цього пристрою в роботі [18, 19] отримані наступні моделі надійності:

$$T_0(t_d) = \frac{1}{\lambda + \lambda_3 q} = \frac{1}{\lambda(1+k_3 q)}; \quad (11)$$

$$P(t, t_d) = \exp \left[ -\frac{t}{T_0(t_d)} \right] = \exp[-\lambda t(1+k_3 q)]; \quad (12)$$

$$T_B(t_d) = \frac{\bar{t}_B + k_3 q T_3^*(t_d)}{1+k_3 q}; \quad (13)$$

$$K_r(t_d) = \left[ 1 + \frac{T_B(t_d)}{T_0(t_d)} \right]^{-1} = \left[ 1 + \lambda(\bar{t}_B + k_3 q T_3^*(t_d)) \right]^{-1}; \quad (14)$$

$$P_{or}(t, t_d) = K_r(t_d) \exp[-\lambda t(1 + k_3 q)], \quad (15)$$

де

$$T_3^*(t_d) = \int_{t_d}^{\infty} \frac{(t-t_d) dF_3(t)}{1-F_3(t_d)} = \frac{1}{1-F_3(t_d)} \int_{t_d}^{\infty} x dF_3(x) - t_d, \quad (16)$$

$$F_3^*(t) = P\{t_3 \leq t\}, \quad q = P\{t_3 \leq t\} = 1 - F_3(t_d), \quad k_3 = \lambda_3 / \lambda.$$

Рівень ТЛКО інформаційних шляхів (маршрутів) і напрямків зв'язку. На рис. 2 зображено фрагмент мережі зв'язку, що складається з окремих напрямків зв'язку, кожний з яких включає в себе сукупність незалежних шляхів.

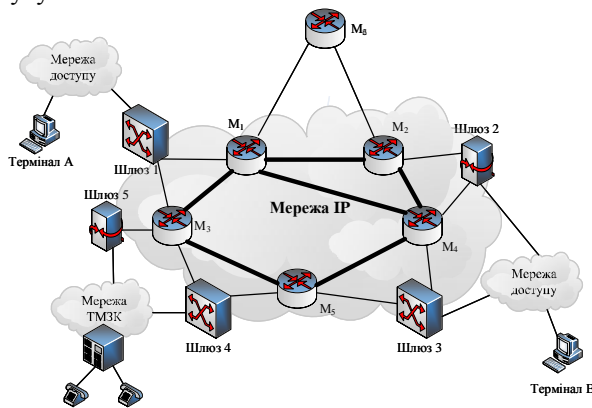


Рис. 2. Фрагмент мережі зв'язку

Розглянемо один з таких шляхів, наприклад, I<sub>14</sub>, що містить в якості типового обладнання маршрутизатори, апаратуру каналотворення і комутації та інші пристрої. Структурна схема надійності шляху наведено на рис. 3 (будемо вважати, що в елементах 1, 3, 4 передбачено часове резервування, а в елементах 2, 5 – часове, структурне і навантажувальне).

В результаті двох послідовних перетворень цієї схеми приходимо до одиночного еквівалентному елементу, показники надійності якого виражаються формулами:

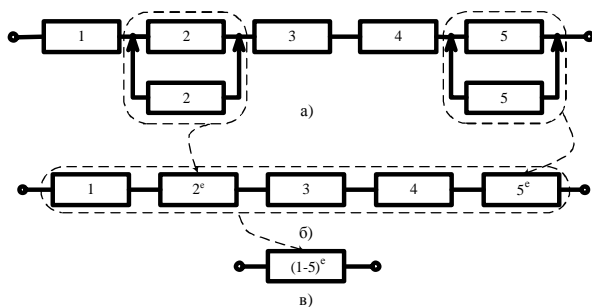


Рис. 3. Структурна схема надійності ТЛКО шляху зв'язку:

- а – до перетворення;
- б – після першого кроку перетворення;
- в – після другого кроку перетворення

$$T_0^{(e)}(t_d) = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 \Lambda_{0i}^{(1)}(t_d)} = \frac{1}{\Lambda_0^{(e)}(t_d)}; \quad (17)$$

$$P^{(e)}(t, t_d) = \prod_{i=1}^5 P_i^{(1)}(t, t_d) = \prod_{i=1}^5 \exp[-t \Lambda_{0i}^{(1)}(t_d)] = \exp[-t \Lambda^{(e)}(t_d)]; \quad (18)$$

$$T_B^{(e)}(t_d) = \sum_{i=1}^5 \frac{\Lambda_{0i}^{(1)}(t_d)}{\Lambda_0^{(e)}(t_d)} T_{Bi}^{(1)}(t_d); \quad (19)$$

$$K_r^{(e)}(t_d) = \prod_{i=1}^5 K_{ri}^{(1)}(t_d) = \prod_{i=1}^5 \frac{T_{0i}^{(1)}(t_d)}{T_{0i}^{(1)}(t_d) + T_B^{(1)}(t_d)} = \frac{T_0^{(e)}(t_d)}{T_0^{(e)}(t_d) + T_B^{(e)}(t_d)}; \quad (20)$$

$$P_{or}^{(e)}(t_d) = K_r^{(e)}(t_d) P^{(e)}(t, t_d) = \frac{T_0^{(e)}(t_d)}{T_0^{(e)}(t_d) + T_B^{(e)}(t_d)} \exp[-t \Lambda_0^{(e)}(t_d)], \quad (21)$$

де  $P_i^{(1)}(t, t_d)$ ;  $T_{Bi}^{(1)}(t_d)$ ;  $K_{ri}^{(1)}(t_d)$ ;  $P_{ori}^{(e)}(t, t_d)$ ,  $T_{0i}^{(1)}(t_d) = \frac{1}{\Lambda_{0i}^{(1)}(t_d)}$ ,  $i = \overline{1,5}$  – показники ТЛКО після

першого кроку перетворення схеми (рис. 3 б), отримані з використанням формул (4) – (16).

Побудуємо структурну схему надійності ТЛКО напрямку зв'язку I<sub>14</sub> (рис. 4), використовуючи для цього фрагмент мережі, представлений на рис. 2.

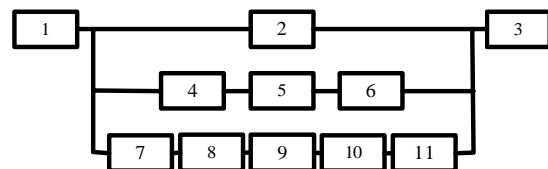


Рис. 4. Структурна схема надійності ТЛКО інформаційного напрямку I<sub>14</sub>

На рис. 4 позначено: 1 – маршрутизатор M<sub>1</sub>, 2 – лінія зв'язку m<sub>14</sub>, 3 – маршрутизатор M<sub>4</sub>, 4 – лінія зв'язку m<sub>12</sub>, 5 – маршрутизатор M<sub>2</sub>, 6 – лінія зв'язку m<sub>24</sub>, 7 – лінія зв'язку m<sub>13</sub>, 8 – маршрутизатор M<sub>3</sub>, 9 – лінія зв'язку m<sub>35</sub>, 10 – маршрутизатор M<sub>5</sub>, 11 – лінія зв'язку m<sub>45</sub>.

Скористаємося процедурою послідовного перетворення даної структурної схеми. На першому кроці ділянки 4 – 6 і 7 – 11 замінюємо еквівалентними елементами 3<sup>(e)</sup> і 4<sup>(e)</sup>, для яких отримуємо сукупність показників надійності T<sub>0</sub>(t<sub>d</sub>), P(t, t<sub>d</sub>), T<sub>B</sub>(t<sub>d</sub>), K<sub>r</sub>(t<sub>d</sub>), P<sub>or</sub>(t, t<sub>d</sub>) з використанням

формул, аналогічних (17) – (21) (індекси  $3^{(e)}$  і  $4^{(e)}$  для спрощення запису опускаємо) (рис. 5 а).

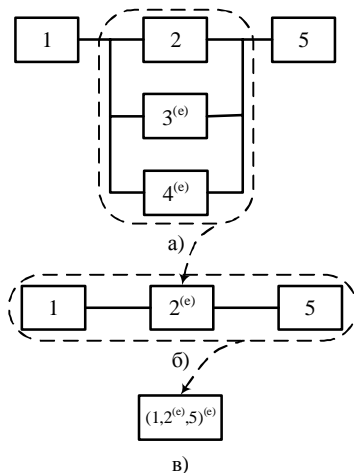


Рис. 5. Структурна схема надійності ТЛКО інформаційного напрямку  $I_{14}$ :

а – після першого перетворення;  
б – після другого перетворення;  
в – після третього перетворення

На другому кроці замінюємо паралельну ділянку схеми 2,  $3^{(e)}$ ,  $4^{(e)}$  одним еквівалентним елементом  $2^{(e)}$  (рис. 5 б), надійність якого визначається формулами:

$$P^{(2^e)}(t, t_d) = 1 - (1 - P^{(2)}(t, t_d))(1 - P^{(3^e)}(t, t_d)) \times (1 - P^{(4^e)}(t, t_d)); \quad (22)$$

$$K_r^{(2^e)}(t_d) = 1 - (1 - K_r^{(2)}(t_d))(1 - K_r^{(3^e)}(t_d)) \times (1 - K_r^{(4^e)}(t_d)); \quad (23)$$

$$P_{ог}^{(2^e)}(t, t_d) = 1 - (1 - P_{ог}^{(2)}(t, t_d))(1 - P_{ог}^{(3^e)}(t, t_d)) \times (1 - P_{ог}^{(4^e)}(t, t_d)). \quad (24)$$

На третьому кроці ділянку структурної схеми з трьох послідовно з'єднаних елементів 1,  $2^{(e)}$ , 5 замінюємо одним еквівалентним елементом  $6^{(e)}$  (рис. 5, в) для оцінки надійності якого можуть бути використані формули (індекс  $6^{(e)}$  опускаємо):

$$P(t, t_d) = P^{(1)}(t, t_d) P^{(2^e)}(t, t_d) P^{(5)}(t, t_d);$$

$$K(t_d) = K_r^{(1)}(t_d) K_r^{(2^e)}(t_d) K_r^{(5)}(t_d);$$

$$P_{ог}(t, t_d) = P_{ог}^{(1)}(t, t_d) P_{ог}^{(2^e)}(t, t_d) P_{ог}^{(5)}(t, t_d),$$

де  $P^{(1)}(t, t_d)$ ;  $P^{(5)}(t, t_d)$ ;  $K_r^{(1)}(t_d)$ ;  $K_r^{(5)}(t_d)$ ;  $P_{ог}^{(1)}(t, t_d)$  і  $P_{ог}^{(5)}(t, t_d)$  виражаються відповідними формулами (12), (14) і (15).

$P^{(2^e)}(t, t_d)$ ;  $K_r^{(2^e)}(t_d)$  і  $P_{ог}^{(2^e)}(t, t_d)$  виражаються формулами (22), (23) та (24).

Таким чином, показники надійності (формули (25) – (27)) одиночного еквівалентного елемента  $6^{(e)}$  (рис. 5 в), до якого ми привели вихідну структурну схему надійності (рис. 4) в результаті трьох послідовних перетворень, відображають надійність телекомунікаційного обладнання розглянутого напрямку зв'язку  $I_{14}$ .

## Висновки

Проведене дослідження дозволило виявити деякі нові особливості надійності функціонування ТЛКО мереж зв'язку, зумовлені, зокрема, урахуванням в моделях надійності не тільки стійких відмов, але і збоїв, що призводять до короточасних перерв у функціонуванні. Отже, основні отримані висновки полягають у наступному:

1. Запропоновано загальний підхід та методику комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання на різних рівнях структури телекомунікаційних мереж.

2. Визначено, що збої суттєво впливають на показники надійності ТЛКО, особливо на показники безвідмовності ( $T_0(t_d)$ ,  $P(t, t_d)$ ) і на комплексний показник – коефіцієнт оперативної готовності  $P_{ог}(t, t_d)$ . Слід зауважити, що коефіцієнт готовності  $K_r(t_d)$  мало чутливий до збоїв.

3. Важливим фактором (ефективним способом) нейтралізації (зменшення) шкідливого впливу збоїв на надійність ТЛКО є часове резервування – використання допустимого часу  $t_d$  перерви в функціонуванні обладнання. При наявності цього параметра  $t_d$  частина збоїв, тривалість яких не перевищує допустимого значення  $t_d$ , не впливає на надійність функціонування ТЛКО – відбувається «розрідження» (зменшення інтенсивності) вхідного потоку збоїв, що призводить до зменшення числа відмов (зривів функціонування) обладнання за рахунок збоїв.

Для отримання більш достовірних розрахункових значень показників надійності ТЛКО мереж зв'язку необхідно використовувати методи, засновані на комплексному підході до оцінки надійності, який дозволяє спільно враховувати всі основні фактори, що впливають на надійність функціонування, зокрема, відмови, збої, різні види резервування обладнання і продуктивність ремонтного органу.

**Подальші дослідження доцільно спрямувати** на обґрунтування шляхів і методів зменшення інтенсивності збоїв в існуючому і перспективному обладнанні, а також розробка ефективних способів нейтралізації (зменшення) їх впливу на процес функціонування ТЛКО мереж зв'язку.

## Список літератури

1. Лаврут О. О., Лаврут Т. В., Климович К. О., Здоренко Ю. М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та

перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2019. Вип. 1 (34), 91-101. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.13>.

2. Лаврут О. О. Дослідження якості управління потоками інформації у моделі військової телекомунікаційної мережі, представленій в тензорному вигляді. *Військово-технічний збірник*, 2015. Вип. 12/2015. С. 27-33.

3. Лаврут О. О., Климович К. О., Тарасюк М. Л., Антонюк О. Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*, 2017. Вип. 1(49). С. 42-49.

4. Нетес В. А. Надежность сетей связи в стандартных МЭК. *Вестник связи*. 2014. Вип. 2, С. 13–15.

5. Ahmad W., Hasan O., Pervez U. and Qadir J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 78, pp. 191-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>

6. Dieves V. Dependability in Future Battle Network System — Transport Layer Ability to Maintain Quality of Service. *Wireless Sensor Network*. 2016. Vol. 08, Iss. 10, pp. 211–228. DOI: <https://doi.org/10.4236/wsn.2016.810017>

7. Samaniego F. J. Studies in Structural, Stochastic and Statistical Reliability for Communication Networks and Engineered Systems. Final Report on ARO grant W911NF-111-0428, 2016, no. 31.

8. Hall P., Jin Y. and Samaniego F.J. (2015) Nonparametric estimation of component reliability based on lifetime data from systems of varying design. *Statistica Sinica*, no. 25, pp. 1313 – 1335. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.2014.192>

9. Jin Y., Hall, P., Jiang J. and Samaniego, F. J. (2017) Estimating Component Reliability Based on Failure Time Data from a System of Unknown Design. *Statistica Sinica*, no. 27, pp. 479-499. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202015.0209>

10. Zhu P., Han J., Guo Y. and Lombardi F. (2016) Reliability and Criticality Analysis of Communication Networks by Stochastic Computation. *IEEE Network*, Vol. 30, Iss. 6, pp. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.1109/mnet.2016.1500221nm>

11. Li T., Cole B., Morton P. and Li D. (1998) Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP). RFC 2281. Network Working Group.

12. Zdorenko Yuriy, Lavrut Oleksandr, Lavrut Tetiana, Nastishin Yuriy. Method of Power Adaptation for Signals Emitted in a Wireless Network in Terms of Neuro-Fuzzy System. *Wireless Personal Communications*, P. 1-13. DOI: [10.1007/s11277-020-07588-5](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07588-5).

13. Klymovych Oleg, Hrabchak Volodymyr, Lavrut Oleksandr, Lavrut Tetiana, Lytvyn Vasyl and Vysotska Victoria. The Diagnostics Methods for Modern Communication Tools in the Armed Forces of Ukraine Based on Neural Network Approach. MOMLET 2020 (Modern Machine Learning Technologies Workshop). P. 198-208. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2631>.

14. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Держстандарт України. Київ. 1995. 96 с.

15. Стойкова Л. С. Обобщенные неравенства Чебышева в их применении в математической теории надежности. *Кибернетика и системный анализ*. 2010. Вип. 3. С. 139-144.

16. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. Леанд. 2016. 256 с.

17. Могилевич Д. І., Кононова І. В., Креденцер Б. П. Оцінка виграшу в надійності при комплексному використанні надлишковості в об'єктах телекомунікацій. *Збірник наукових праць ВІПТ*. Київ. 2017. Вип. 2. С. 48-57.

18. Mogylevych D., Kononova I, Kredenzner B., Oksiuk O. Reliability of Redundant Telecommunications Equipment Advanced Model Considering Failures and Refusals of Structure Elements. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) 2019*. pp. 238-243. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030502>

19. Mogylevych D. and Kononova I. (2019) Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. In: Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. (eds). *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Champ., vol 560, pp. 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).

## References

1. Lavrut O.O., Lavrut T.V., Klymovych K.O., Zdorenko Yu.M. Novitni tehnologii ta zasoby zviazku u Zbroinykh Sylakh Ukrainy: shliakh transformatsii ta perspektivy rozvytku. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, 2019. Vyp. 1 (34), PP. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.13>.

2. Lavrut O.O. Doslidzhennia yakosti upravlinnia potokamy informatsii u modeli viiskovoi telekomunikatsiinoi merezhi predstavlenii v tenzornomu vyhladi. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 2015. Vyp. 12/2015. PP. 27-33.

3. Lavrut O.O., Klymovych K.O., Tarasiuk M.L., Antoniuk O.L. Stan ta perspektivy zastosuvannia suchasnykh tehnologii ta zasobiv radiozviazku v Zbroinykh Sylakh Ukrainy. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2017. Vyp. 1(49). PP. 42-49.

4. Netes V.A. Reliability of communication networks in IEC standards. *Vestnyk sviazy*. 2014. No. 2, pp.13–15.

5. Ahmad W., Hasan O., Pervez U. and Qadir J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 78, pp. 191-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>

6. Dieves V. Dependability in Future Battle Network System — Transport Layer Ability to Maintain Quality of Service. *Wireless Sensor Network*. 2016. Vol. 08, Iss. 10, pp. 211–228. DOI: <https://doi.org/10.4236/wsn.2016.810017>

7. Samaniego F. J. Studies in Structural, Stochastic and Statistical Reliability for Communication Networks and Engineered Systems. Final Report on ARO grant W911NF-111-0428, 2016, no. 31.

8. Hall P., Jin Y. and Samaniego F.J. (2015) Nonparametric estimation of component reliability based on lifetime data from systems of varying design. *Statistica Sinica*, no. 25, pp. 1313 – 1335. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.2014.192>

9. Jin Y., Hall, P., Jiang J. and Samaniego, F. J. (2017) Estimating Component Reliability Based on Failure Time Data from a System of Unknown Design. *Statistica Sinica*, no. 27, pp. 479-499. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202015.0209>

10. Zhu P., Han J., Guo Y. and Lombardi F. (2016) Reliability and Criticality Analysis of Communication Networks by Stochastic Computation. *IEEE Network*, Vol. 30, Iss. 6, pp. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.1109/mnet.2016.1500221nm>

11. Li T., Cole B., Morton P. and Li D. (1998) Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP). RFC 2281. Network Working Group.

12. Zdorenko Yuriy, Lavrut Oleksandr, Lavrut Tetiana, Nastishin Yuriy. Method of Power Adaptation for Signals Emitted in a Wireless Network in Terms of Neuro-Fuzzy System. *Wireless Personal Communications*, P. 1-13. DOI: [10.1007/s11277-020-07588-5](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07588-5).



13. Klymovych Oleg, Hrabchak Volodymyr, Lavrut Oleksandr, Lavrut Tetiana, Lytvyn Vasyl and Vysotska Victoria. *The Diagnostics Methods for Modern Communication Tools in the Armed Forces of Ukraine Based on Neural Network Approach. MOMLET 2020 (Modern Machine Learning Technologies Workshop)*. P. 198-208. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2631>.

14. DSTU 2860-94. *Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia [State Standard of Ukraine 2860-94. Dependability of technics. Terms and definitions]*. Kyiv. 1995. 96 p.

15. Stoikova L.S. *Generalized Chebyshev inequalities and their application in mathematical reliability theory*. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2010. Vol. 3, pp. 139–144.

16. Vyktorova V.S. and Stepanians A.S. *Models and methods for calculating the reliability of technical systems*. Lenand. 2016. 256 p.

17. Kononova I., Kredentser B., Mogylevych D. *Estimation of gain in reliability at complex use of surplus in objects of*

*telecommunications. collection of scientific works MITI*. Kyiv. 2017. Vol. 2, pp. 48–57.

18. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser B., Oksiiuk O. *Reliability of Redundant Telecommunications Equipment Advanced Model Considering Failures and Refusals of Structure Elements*. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) 2019*. pp. 238-243. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030502>

19. Mogylevych D. and Kononova I. (2019) *Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information*. In: Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. (eds). *Advances in Information and Communication Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Champ., vol 560, pp. 101-117*. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7\_5.

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Д.И. Могилевич, И.В. Кононова, О.К. Климович, В.Д. Могилевич

*Эффективность функционирования телекоммуникационных систем, которые относятся к классу сложных технических систем, зависит от надежности составляющих ее подсистем, а также сложности связей между ними. Целью статьи является обоснование общего подхода к комплексной оценке надежности телекоммуникационного оборудования телекоммуникационной сети с приводимой структурой с разработкой методики расчета показателей надежности оборудования.*

*В статье представлено формализованное описание научной проблемы и предложен общий подход решения задачи который базируется на использовании принципа декомпозиции, что позволяет поэтапно проводить оценку надежности телекоммуникационной сети на трех взаимосвязанных уровнях: первый этап – на уровне отдельных элементов оборудования (таких типовых устройств, как маршрутизаторы, коммутаторы, сервера, рабочие станции, аппаратура IP-шифрования и т.д.), в которых различные типы резервирования могут быть предусмотрены отдельно или совместно: структурного, нагрузочного, временного; второй этап – на уровне телекоммуникационного оборудования информационных путей (маршрутов); третий этап – на уровне телекоммуникационного оборудования информационных направлений.*

*Предложена методика комплексной оценки надежности телекоммуникационного оборудования сетей связи с приводимой структурой, учитывающая совокупность факторов, одни из которых являются агрессивными и приводят к снижению надежности (сбои, вызывающие кратковременные перерывы в функционировании; устойчивые отказы оборудования, которые нуждаются в восстановлении работоспособности отказавших устройств в ремонтном органе; недостаточная квалификация обслуживающего персонала), а другие – поддерживают нормальное функционирование телекоммуникационного оборудования на заданном уровне.*

**Ключевые слова:** надежность; телекоммуникационное оборудование; отказы; сбои; резервирование.

## TECHNIQUE OF COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT OF COMMUNICATION NETWORKS

D. Mogylevych, I. Kononova, O. Klymovych, V. Mohylevych

*The effectiveness of the functioning of telecommunication systems, which belong to the class of complex technical systems, depends on the reliability of its subsystems and elements, as well as the complexity of the relationships between them. The aim of the article is to substantiate a general approach to a comprehensive assessment of the reliability of telecommunication equipment telecommunications network with a reducible structure with the development of a methodology for calculating equipment reliability indicators.*

*This article presents a formal description of a scientific problem and offers a general approach to solving the problem is based on the use of the decomposition principle, which allows a phased assessment of the reliability of a telecommunication network at three interconnected levels: the first stage is at the level of individual equipment elements (such typical devices as routers, switches, servers, workers stations, IP-encryption equipment, etc.), in which various types of redundancy can be provided separately or jointly: structural, load, temporary; the second stage – at the telecommunication equipment level of information paths (routes); the third stage is at the telecommunication equipment level of information areas, which are a combination of equipment of various paths.*

*Methodology for solving the problem. A technique has been proposed for a comprehensive reliability assessment of telecommunication equipment of communication networks with a reducible structure, taking into account a combination of factors, some of which are aggressive and lead to a decrease in reliability (failures causing short-term interruptions in operation; steady equipment failures that need to be restored to serviceability of failed devices in a repair body ; insufficient qualification of the attendants), and others – support the normal functioning of the telecommunication equipment in at the given level*

**Keywords:** reliability; telecommunication equipment; refusals; failures; redundanc.