

Л. М. Сакович¹, Г. Я. Криховецький², Я. Е. Курята¹

¹ Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

² Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна

ОЦІНКА СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. В статті запропоновано, для підвищення точності кількісної оцінки часткових і комплексних показників надійності напрямків зв'язку, вперше врахувати час роботи окремих засобів зв'язку. Сутність пропозицій полягає у використанні математичної моделі оцінки значень показників надійності об'єктів зі змінною структурою. Тобто, для організації зв'язку між абонентами, можливе використання різноманітних каналів зв'язку із множини можливих, які завантажені у різний час. Формалізовано рішення цієї задачі і приведено приклад використання результатів досліджень. Ефект від реалізації пропозицій щодо кількісної оцінки значень показників надійності напрямків зв'язку полягає у забезпеченні необхідного рівня надійності мінімальною кількістю каналів і засобів зв'язку.

Ключові слова: структурна надійність, напрямки зв'язку, оцінка часткових і комплексних показників надійності.

Вступ

Досвід військових конфліктів останніх років свідчить про необхідність забезпечення високої стійкої систем зв'язку, тобто їх живучості й надійності. Оцінка структурної надійності під час модернізації існуючих і проектуванні перспективних цифрових систем зв'язку спрямована на мінімізацію необхідної кількості каналів і засобів зв'язку при забезпеченні високих вимог до їхнього застосування за призначенням з необхідною якістю. Але існуючі методики не враховують сучасні досягнення у галузі надійності великих технічних систем.

Постановка проблеми. Не має сенсу оцінювати надійність системи зв'язку в цілому, через те, що відмова засобів зв'язку в одному напрямку не впливає на якість зв'язку в інших. Тобто необхідно кількісно оцінювати структурну надійність напрямків зв'язку між конкретними абонентами. Але в дійсний час при цьому враховують структуру системи зв'язку і статистичні дані щодо відмов окремих засобів зв'язку в певних умовах. Однак, до теперішнього часу, відомі методики оцінки надійності системи зв'язку не враховують час роботи окремих засобів, що суттєво впливає на надійність напрямків зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі теорії надійності складних технічних об'єктів і систем спрямовані на отримання необхідних значень показників якості за рахунок впровадження резервування найменш надійних елементів, що має місце при організації зв'язку різноманітними засобами. При цьому традиційно використовують оцінку комплексного показника надійності – коефіцієнта готовності за умови, що всі елементи системи зв'язку працюють одночасно [1-3]. Але реально системи зв'язку використовують різний час, що впливає на показники надійності. Це показано на прикладі засобів зв'язку, які відрізняються багато режимністю, тобто відносяться до об'єктів зі змінною структурою [4, 5]. Крім того, для абонентів систем зв'язку найважливішим є не кое-

фіцієнт готовності обладнання, а ймовірність зв'язності, що не завжди враховується [6-10]. Таким чином, у відомих наукових публікаціях не розглянуто вплив властивості зміни структури системи зв'язку під час її використання за призначенням, що не дозволяє об'єктивно оцінювати реальну структурну надійність й потребує використання додаткових каналів зв'язку для досягнення необхідних значень показників надійності.

Мета статті – використання властивості зміни структури системи зв'язку під час її застосування за призначенням для отримання об'єктивної оцінки структурної надійності.

Виклад основного матеріалу

Система зв'язку – це сукупність взаємопов'язаних і узгоджених за завданням, місцем і часом дії вузлів та ліній зв'язку різноманітного призначення, що розгортаються та використовуються з метою розв'язання завдань обміну інформацією між абонентами [10-12]. Вона характеризується показниками, що приведені на рис. 1.

Згідно з [11], мобільність системи військового зв'язку – це її здатність у встановлений термін розгортатися, згортатися, переміщуватися та змінювати свою структуру відповідно до обстановки. Тобто вона відноситься до об'єктів зі змінною структурою, що не враховано у відомих методиках оцінки структурної надійності.

Інформаційний напрямок зв'язку – це сукупність вузлів та ліній зв'язку, яка забезпечує зв'язок між двома пунктами управління. Види зв'язку розрізняють по засобам зв'язку: каналотворювальні, комутаційні, кінцеві, автоматизації, спеціальні. До каналотворювальних засобів відносяться провідний зв'язок, оптико-електронний зв'язок, радіозв'язок, тропосферний радіозв'язок, космічний радіозв'язок, радіорелейний радіозв'язок та інші [11, 12].

Надійність системи зв'язку – це здатність забезпечувати зв'язок, зберігаючи в часі значення експлуатаційних показників у межах, передбачених нормативною і технічною документацією [3, 9, 10].



Рис. 1. Показники якості системи зв'язку

Структурна надійність системи зв'язку – об'єктивна властивість забезпечувати обмін інформацією користувачами мережі, з якістю не нижчою від заданої [3, 6, 10]. Її основні показники – коефіцієнт готовності та ймовірність зв'язності (рис. 1). Коефіцієнт готовності (A) – ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких його використання за призначенням не передбачене [13]:

$$A_j = \frac{T}{(T + T_b)}$$

де T – середній наробіток на відмову, T_b – середня тривалість відновлення.

Коефіцієнт готовності являє собою ймовірність технічної справності всіх елементів системи зв'язку і готовності всіх напрямків зв'язку до функціонування в повному обсязі. Проте для систем зв'язку більш об'єктивною характеристикою є ймовірність зв'язності абонентів P_3 , тобто ймовірність технічної готовності до обміну інформацією принаймні по одному каналу зв'язку [6-8, 10]. Вочевидь, що завжди $A \leq P_3$, причому рівність досягається коли кожний елемент системи використовується тільки в одному напрямі й тільки один раз. У системах із сильним взаємозв'язком елементів, що відповідає реальним системам зв'язку, задача зводиться до визначення ймовірності справного стану хоча б одного шляху з множини можливих (m) [5-10]:

$$P_3 = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - A_j),$$

де A_j – коефіцієнт готовності шляху j між абонентами.

Під час вибору каналів зв'язку необхідно враховувати не тільки надійність засобів зв'язку, а й ерлангові втрати p , зумовлені зайнятістю каналів

за час t , що відводиться на передавання повідомлення [5-10]:

$$W = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - A_j E_j),$$

$$E_j = (1 - p) \exp\left(-\frac{t}{T_j}\right),$$

де W – комплексний показник надійності напрямку зв'язку, T_j – наробіток на відмову засобів зв'язку шляху j , E_j – коефіцієнт врахування надійності засобів зв'язку та ерлангових втрат.

Завжди $W < P_3$, тому що кількісно оцінює потенційну структурну надійність мережі зв'язку без врахування її навантаження.

Значення кількісних показників надійності засобів зв'язку отримують з їхнього технічного опису, керівних документів з надійності, але найбільш об'єктивну оцінку дає аналіз статистичних даних щодо наробітку на відмову T_i , середнього часу відновлення $T_{вi}$ і коефіцієнту готовності A_i засобу зв'язку виду $i = \overline{1, L}$, де L – кількість видів засобів зв'язку у системі.

В системі зв'язку її елементи працюють різний час, тому для аналізу структурної надійності окремих напрямків зв'язку доцільно використовувати результати, отримані для об'єктів зі змінною структурою [4, 5].

Розглянемо результати оцінки структурної надійності при традиційному підході [1-3, 6-10] в порівнянні з врахуванням часу роботи окремих елементів в системі зв'язку, як об'єктів зі змінною структурою [4, 5] на конкретному прикладі фрагмента системи зв'язку приведеному на рис. 2.

Показники надійності елементів за результатами експлуатації приведені в табл. 1.

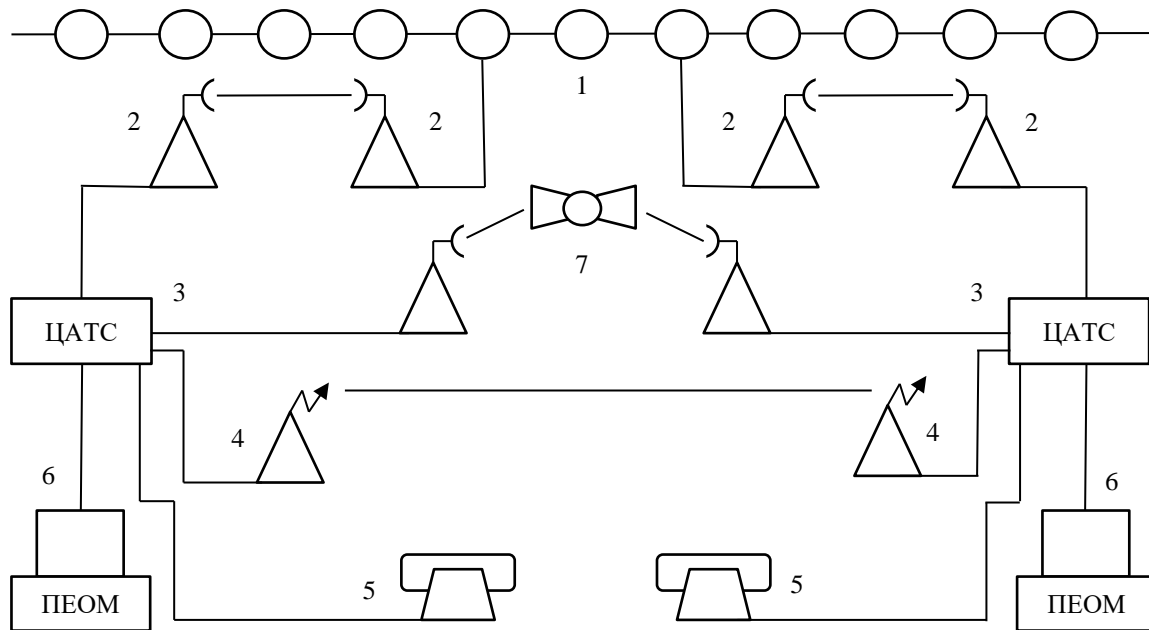


Рис. 2. Фрагмент системи зв'язку

Таблиця 1 – Показники надійності елементів напрямку зв'язку

| i | Засоби зв'язку | T_i , год | T_{vi} , год | A_i |
|-----|--|-------------|----------------|----------|
| 1. | Мережа урядового зв'язку (оренда каналів) | 8000 | 0,40 | 0,99995 |
| 2. | Радіорелейні станції | 5000 | 0,33 | 0,999934 |
| 3. | Цифрова АТС | 2300 | 3,00 | 0,99869 |
| 4. | Радіостанція | 2000 | 0,33 | 0,99983 |
| 5. | Телефонний апарат | 800 | 1,00 | 0,99875 |
| 6. | Переносна ЕОМ | 1500 | 0,50 | 0,99967 |
| 7. | Комплекс космічного зв'язку (оренда каналів) | 12000 | 1,17 | 0,9999 |

Нижню межу значення структурної надійності напрямку зв'язку отримуємо за умови, що засоби зв'язку використовують цілодобово протягом року. Задача аналогічна орієнтовній оцінці надійності радіоелектронних засобів під час їхнього проектування, коли відома кількість елементів усіх типів у виробі та їхній параметр потоку відмов $Z_i = 1/T_i$. При використанні n_i адаптивних елементів в напрямку зв'язку, його параметр потоку відмов дорівнює

$$Z_H = \sum_{i=1}^L n_i Z_i.$$

В такому разі наробіток напрямку зв'язку на відмову дорівнює $T = 1/Z_H$, а прогнозована кількість відмов за рік експлуатації $T_p = 8760$ год елементів виду i

$$N_i = n_i T_p Z_i = n_i T_p / T_i.$$

Тоді прогнозована кількість відмов напрямку зв'язку за рік експлуатації

$$N = \sum_{i=1}^L N_i = T_p \sum_{i=1}^L n_i / T_i.$$

Наробіток на відмову напрямку зв'язку за рік експлуатації $T = T_p / N$, а середній час відновлення після відмови

$$T_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L N_i n_i T_{vi}.$$

Це найгірший випадок і якщо результати задовольняють, то далі оцінюють реальні значення показників надійності з врахуванням відносного часу роботи окремих елементів u_i протягом року:

$$T_{pi} = u_i T_p, \quad N_i = n_i T_{pi} / T_i, \quad N = \sum_{i=1}^L N_i;$$

$$T = \frac{T_p}{N}, \quad T_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L N_i T_{vi}, \quad A = T / (T + T_B).$$

Результати розрахунків для прикладу, що розглядається, приведено в табл. 2 і 3, відповідно. За даними табл. 2 отримуємо:

$$Z_H = 0,00671; \quad T = 149 \text{ год}; \quad N = 58,8; \quad T_B = 2 \text{ год}.$$

Аналіз отриманих результатів показує, що найменш надійним елементом є телефонний апарат, а найбільший час відновлення за рік безперервної експлуатації потребує цифрова АТС. Нижня межа коефіцієнту готовності напрямку зв'язку дорівнює $A_H = T / (T + T_B) = 0,987$; $U_H = 0,013$, що є неприйнятним.

Результати розрахунків значень показників надійності напрямку зв'язку з врахуванням відносного часу роботи окремих елементів приведено в табл. 3, при цьому $N = 24,8$; $T = 353,2$ год; $T_B = 1,28$ год.

Таблиця 2 – Розрахунки нижньої межі значень показників надійності напрямку зв'язку при $T_{pi} = T_p = 8760$ год

| i | n_i | Z_i | $n_i Z_i$ | N_i | $N_i n_i T_{vi}$ |
|-----|-------|----------|-----------|--------|------------------|
| 1 | 1 | 0,000125 | 0,000125 | 1,095 | 0,438 |
| 2 | 4 | 0,0002 | 0,0008 | 7,008 | 9,250 |
| 3 | 2 | 0,000435 | 0,00087 | 7,621 | 45,726 |
| 4 | 2 | 0,0005 | 0,0010 | 8,760 | 5,782 |
| 5 | 2 | 0,00125 | 0,0025 | 21,900 | 43,800 |
| 6 | 2 | 0,000667 | 0,00133 | 11,651 | 11,651 |
| 7 | 1 | 0,000083 | 0,000083 | 0,7271 | 0,851 |

Таблиця 3 – Розрахунок значень показників надійності напрямку зв'язку із врахуванням відносного часу роботи елементів

| i | u_i | T_{pi} , год | N_i | $N_i T_{vi}$ |
|-----|-------|----------------|-------|--------------|
| 1 | 0,95 | 8322 | 1,04 | 0,416 |
| 2 | 0,95 | 8322 | 3,33 | 1,099 |
| 3 | 1,00 | 8760 | 7,62 | 22,86 |
| 4 | 0,01 | 87,6 | 0,09 | 0,030 |
| 5 | 0,10 | 876 | 2,19 | 2,190 |
| 6 | 0,90 | 7884 | 10,51 | 5,100 |
| 7 | 0,04 | 350 | 0,03 | 0,035 |

Коефіцієнт готовності напрямку зв'язку з урахуванням відносного часу роботи елементів

$$A_n = 0,996; U_n = 0,004.$$

Значення T_i , T_{vi} й A_i не залежать від відносного часу роботи елементів, тому для оцінки значень показників надійності напрямку зв'язку відповідно рекомендацій [1-3, 6-10] перетворюємо схему зв'язку (рис. 2) у модель з надійності (рис. 3).

При паралельно-последовному з'єднанні елементів отримуємо

$$A = A_{56}^2 A_3^2 (1 - (1 - A_2^4 A_1)(1 - A_7)(1 - A_4^2));$$

$$A_{56}^2 = (1 - (1 - A_5)(1 - A_6))^2.$$

Після підстановки A_i з табл. 1 отримуємо $A = 0,9974$; $U = 0,0026$.

При цьому значення коефіцієнту готовності напрямку зв'язку відрізняється від отриманого з урахуванням відносного часу роботи елементів всього на 0,14%.

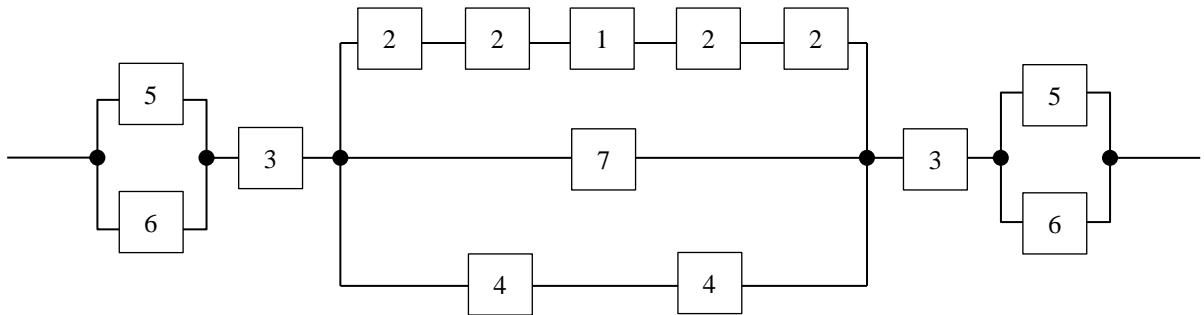


Рис. 3. Модель з надійності напрямку зв'язку

Якщо схема з'єднання елементів відрізняється від паралельно-последовної, задача розрахунку суттєво ускладнюється [1-3]. Наприклад, для схеми, приведеної на рис.4., отримуємо:

$$A_c = A_3 \times ((1 - (1 - A_1)(1 - A_2))(1 - (1 - A_4))(1 - A_5)) + (1 - A_3)(1 - A_2 A_5)(1 - A_1 A_4).$$

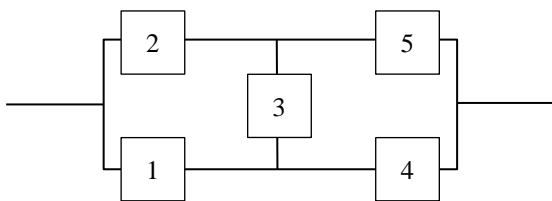


Рис. 4. Схема з'єднання елементів, що відрізняється від паралельно-последовної

Розрахунок спрощується, якщо $A_i = A$:

$$A_c = A(1 - (1 - A)^2)^2 + (1 - A)(1 - (1 - A^2)^2).$$

Порівняльний аналіз варіантів розрахунку показників надійності інформаційного напрямку зв'язку показує доцільність врахування відносного часу роботи окремих елементів.

Це забезпечує достатню точність результатів розрахунку при спрощенні їх реалізації, особливо при наявності складної схеми з'єднання елементів яка відрізняється від паралельно-последовного з'єднання.

Алгоритм реалізації запропонованого підходу щодо кількісної оцінки показників надійності інформаційного напрямку зв'язку формалізовано на рис. 5, де A_n і P_{zn} – припустимі значення коефіцієнту готовності та ймовірності зв'язності абонентів, відповідно.

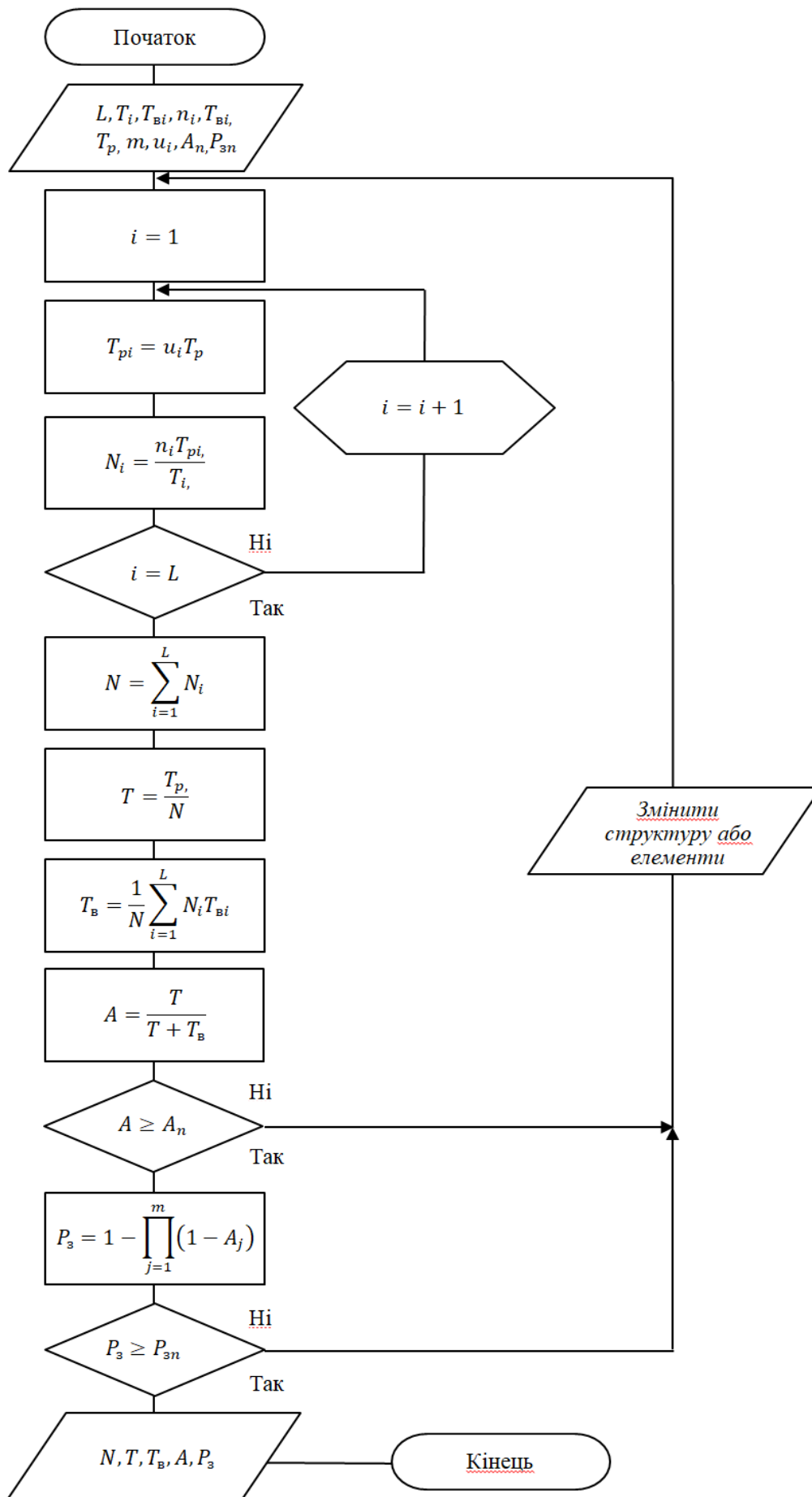


Рис. 5. Блок-схема алгоритму оцінки показників напрямку зв'язку

Висновки

В результаті порівняльного аналізу можливих варіантів кількісної оцінки показників надійності інформаційних напрямків зв'язку показано, що врахування відносного часу роботи окремих елементів дозволяє з необхідною точністю оцінити часткові (наробіток на відмову, середній час відновлення) і комплексні (коефіцієнт готовності і неготовності, ймовірність зв'язності абонентів) значення показників надійності.

На відміну від існуючих методик оцінки значень показників, запропонований підхід щодо оцін-

ки значень показників надійності відрізняється спрощенням розрахунків при необхідній точності результатів, використанням вперше властивості змін структури з'єднання елементів напрямку зв'язку, тобто врахуванням відносного часу роботи окремих елементів.

Реалізація запропонованих пропозицій щодо оцінки значень показників надійності інформаційних напрямків зв'язку існуючих та перспективних систем спеціального зв'язку дозволяє забезпечити необхідне значення часткових і комплексних показників з мінімальною необхідною кількістю каналів і засобів зв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайцева Е.Н. Исследование надежности информационных систем // *Электросвязь*. – 2003. – № 6. – С. 37-39.
2. Романов О.І. Оцінка впливу та структури напрямків зв'язку на живучість телекомунікаційних мереж / О.І. Романов, В.Д. Голь, О.В. Волков // *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ”*. – 2005. – Вип. № 1, – С. 142-150.
3. Харьбин А.В. О подходе к решению задачи выбора методологии оценки структурной надежности и живучести информационных систем критического применения / А.В. Харьбин, О.Н. Одарущенко // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 6. – С. 61-70.
4. Yevhen Ryzhov, Lev Sakovych, Oleksandr Puchkov, Yana Nebesna. Evaluation of reliability of radioelectronic devices with variable structure. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 3(54), 2020 pp. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-3>.
5. Sergii Gnatiuk. Method of Estimating the Values of Reliability Indicators of Objects with Variable Structure / S. Gnatiuk, L. Sakovich, Y. Kuryata, R. Odarchenko, V. Gnatiuk // *CPITS-2022: Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, October 13, 2022, Kyiv, Ukraine, P. 33-43.
6. Рижак В.А., Сакович Л.М. Кількісне оцінювання структурної надійності систем зв'язку // *Зв'язок*, 2004. - № 4. - С. 53-57.
7. Гнатюк С. С. Аналіз показників надійності систем спеціального зв'язку / С.С. Гнатюк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – № 6(12). – С. 45-50.
8. Гнатюк С.С. Кількісне оцінювання значень показників надійності систем зв'язку / Л.М.Сакович, С.С.Гнатюк // *Зв'язок*. – 2013. – № 6. – С. 10-15.
9. Поповский В. В. Методы априорной оценки сетевой надёжности / В. В. Поповский, В. С. Волотка // *Радиотехника*. – 2014. – Вып. 178. – С. 20-23.
10. Гнатюк С.С. Методика оцінки показників надійності систем спеціального зв'язку / С.С.Гнатюк, Л.М.Сакович // *Озброєння та військова техніка*. – №1 (5). – 2015, С. 26-28.
11. Зв'язок військовий. Терміни та визначення: ДСТУ В. 3265–95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 78 с.
12. Основи теорії систем зв'язку: Математичні моделі телекомунікаційних систем / В. Ф. Олійник. – К. : Техніка, 2000. – 152 с. – ISBN 966-575-028-3.
13. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 89 с.

Received (Надійшла) 17.03.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.05.2023

Evaluation of structural reliability of communication systems

L. Sakovich, G. Krykhovetskyi, Ya. Kuryata

Abstract. In order to increase the accuracy of the quantitative assessment of partial and complex indicators of the reliability of communication directions, the article proposes to take into account the operating time of individual means of communication for the first time. The essence of the proposals consists in the use of a mathematical model for estimating the values of the reliability indicators of objects with a variable structure. That is, to organize communication between subscribers, it is possible to use various communication channels from a set of possible ones that are loaded at different times. The solution to this problem is formalized and an example of the use of research results is given. The effect of the implementation of the proposals regarding the quantitative assessment of the values of the reliability indicators of the communication directions is to ensure the required level of reliability with the minimum number of channels and means of communication.

Keywords: structural reliability, directions of communication, assessment of partial and complex indicators of reliability.