

УДК 621.396.6

Л.М. Сакович, В.П. Романенко, І.М. Гиренко

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ ЗАСОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З КРАТНИМИ ДЕФЕКТАМИ

*В статті на основі використання результатів сучасних досліджень в галузі технічної діагностики і метрології запропоновано математичну модель кількісної оцінки середнього часу відновлення засобів спеціального зв'язку з кратними дефектами, яка враховує етапи дефектації й пошуку дефектів екіпажами апаратних зв'язку або апаратних технічного забезпечення.*

**Ключові слова:** засоби спеціального зв'язку, дефектація, пошук кратних дефектів, відновлення працездатності.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Засоби спеціального зв'язку (далі – ЗСЗ) внаслідок аварійних пошкоджень, порушення правил експлуатації, довгострокового зберігання в несприятливих кліматичних умовах, а також під час бойових дій отримують кратні дефекти. У цих випадках відновлення ЗСЗ екіпажами апаратних зв'язку або апаратних технічного забезпечення в польових умовах суттєво відрізняються від поточного ремонту: першочергово на місці пошкодження в результаті попередньої дефектації встановлюється ступінь пошкодження і місце ремонту, потім в ремонтному органі під час повної дефектації фахівці усувають явні дефекти. Подалі пошук скритих дефектів виконують з використанням ефективних процедур, що дозволяє скоротити час відновлення. Тому проблема моделювання процесу ремонту засобів спеціального зв'язку з кратними дефектами є досить актуальною для забезпечення необхідної укомплектованості системи урядового зв'язку як в мирний, так і військовий час за рахунок підвищення ефективності ремонтних органів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних публікацій показує відсутність математичної моделі, яка охоплює усі етапи відновлення ЗСЗ з кратними дефектами одночасно. В [1, 2] запропоновано ремонт агрегатним методом зі зниженням показників якості ЗСЗ для скорочення часу відновлення. Етапи дефектації розглянуто в [3, 4], а пошук кратних дефектів окремо в [5–7]. В роботі [8] розглянуто вплив метрологічного забезпечення на якість діагностування. Але комплексний підхід до відновлення ЗСЗ з кратними дефектами як єдиного процесу відсутній.

**Мета статті** – отримання математичної моделі процесу ремонту ЗСЗ з кратними дефектами для раціонального розподілу працевтрат між етапами дефектації і діагностуванням, що дозволяє скороти-

ти середній час відновлення працездатності в польових умовах.

### Виклад основного матеріалу

Першочергово під час розбирання та зовнішнього огляду пошкодженого об'єкту виконують усунення явних дефектів, згідно [4, 9] їх доля складає до 90 % від загальної кількості пошкоджених елементів ЗСЗ. В найгіршому випадку при слабкому ступеню пошкодження ЗСЗ вона дорівнює 0,09L, після чого необхідно під час повної дефектації та діагностування усунути останні 0,001L дефектів. Під час повної дефектації можливо використання комбінованих засобів вимірювань – ампервольтметрів, які є в складі кожної апаратної спеціального зв'язку. Це необхідно для оцінки працездатності окремих елементів ЗСЗ.

Відомо два підходи до моделювання часу повної дефектації: збільшення часу пошуку явних дефектів та усунення спричинених ними несправностей по закону геометричної прогресії або експоненціальному закону [3, 4].

В першому випадку після початку дефектації визначається час виявлення першого дефекту ( $t_1$ ) та дефекту  $n < 10(t_n)$ , тоді коефіцієнт геометричної прогресії  $g = n\sqrt[n]{t_n} / t_1$  та розрахунковий час виявлення та усунення  $Q_0$  дефектів дорівнює

$$T_1 = \frac{t_1(g^{Q_0} - 1)}{g - 1} + t_y Q_0, \quad (1)$$

де  $t_y$  – час усунення однієї несправності.

У другому випадку після початку дефектації визначається час, затрачений на пошук та усунення дефектів  $i(t_i)$  та  $j(t_j)$ , а також загальний час з початку дефектації на їх пошук та усунення ( $T_i, T_j$ ), при цьому  $i < j$ . Потім вираховуються числові значення коефіцієнтів

$$a = \frac{\ln(t_i/t_j)}{T_j - T_i};$$

$$b = \exp(\ln t_i + aT_i)$$

та прогнозується час дефектації для заданого максимального значення часу пошуку чергового дефекту  $t_m$ :

$$T_1'' = \frac{1}{a} \ln(bt_m).$$

На другому етапі відновлення об'єкту з кратними дефектами в процесі діагностування здійснюється пошук та усуненням скритих дефектів  $Q_c$ .

Об'єкт поділяється на  $G$  груп в припущенні, що  $Q_c \leq G$ . Тоді при діагностуванні одним фахівцем ( $\mu = 1$ ) та використанні усіченої процедури пошуку (далі – УПП) [5] середній час реалізації другого етапу відновлення становить

$$T_2' = \frac{G(t(2 + \log_2 l) + t_y)}{p^{2 + \log_2 l}}, \quad (2)$$

де  $t$  – середній час виконання перевірки;

$l = L / Q_c$  – число елементів у групі;

$p$  – ймовірність вірної оцінки результату виконання перевірки;

$L$  – загальне число елементів у об'єкті.

Математичне сподівання відхилення діагнозу при одній помилці в оцінці результату виконання перевірки [8]

$$\rho = 0,5(1 + \log_2 l - 1)(1 - p)p^{\log_2 l - 1}.$$

При відновленні об'єкту великої розмірності з рознесеними у просторі елементами доцільно використовувати спільний груповий пошук дефектів ( $\mu > 1$ ) [6, 7]. У цьому випадку об'єкт краще поділяти на  $G_0 = \frac{\mu Q_c}{(1 - Q_c / L) \ln(\mu + 1)}$  груп елементів.

Сумарне число перевірок для пошуку всіх  $Q_c$  дефектів становить

$$K_\Sigma = \frac{(G - Q_c)(G + (\mu + 1)Q_c)}{2\mu G Q_c} + (Q_c - 1) \left[ 1 + \frac{G(L - Q_c)}{\mu L Q_c} \right] + Q_c \log_{\mu + 1} \frac{L}{G}, \quad (3)$$

а середній час реалізації другого етапу відновлення

$$T_2'' = \frac{tK_\Sigma + t_y Q_c / \mu}{p^{\mu(1 + \log_{\mu + 1} L/G)}}. \quad (4)$$

Математичну модель розподілу часу процесу відновлення ЗСЗ слабкого ступеня пошкодження приведено в табл. 1, де значення  $K_\Sigma$  визначають згідно виразу (3).

Таблиця 1

Розподіл часу відновлення засобів спеціального зв'язку слабкого ступеня пошкодження залежно від кількості фахівців

Етап відновлення	Кількість фахівців	
	$\mu = 1$	$\mu > 1$
Усунення явних дефектів, $m_0$ , хв	$0,09L t_y$	$0,09L t_y / \mu$
Повна дефектація, $m_1$ , хв	$\frac{t_1(g^{Q_0} - 1)}{g - 1} + t_y Q_0$	$\frac{t_1(g^{Q_0} - 1)}{\mu(g - 1)} + \frac{t_y Q_0 (g - 1)}{\mu(g - 1)}$
Діагностування, $m_2$ , хв	$\frac{G(t(2 + \log_2 l) + t_y)}{p^{2 + \log_2 l}}$	$\frac{tK_\Sigma + t_y Q_0 / \mu}{p^{\mu(1 + \log_{\mu + 1} l)}}$
Загальний час відновлення, $m_b$ , год.	$\frac{T_0 + T_1 + T_2}{60}$	

Приведені математичні співвідношення не враховують організаційні витрати часу.

Загальний час ремонту об'єкту після усунення явних дефектів

$$T_b = T_1 / \mu + T_2$$

та залежить від якості дефектації. При цьому представляє практичний інтерес знаходження числа дефектів  $Q_c$ , при якому  $T_b$  мінімальний: при збіль-

шенні  $Q_c$  значення  $T_1$  збільшується, а  $T_2$  – зменшується. Традиційний метод знаходження екстремуму функції

$$\frac{dT_b(Q_0)}{dQ_0} = 0$$

приводить до отримання трансцендентного рівняння, розв'язати яке в явному вигляді не представляє можливості:

$$\left[ \frac{2(\ln(SL - Q_0) + 1)}{\ln 2} - n \right] \frac{1}{\mu} + ag^{Q_0} \ln g =$$

$$\ln p \left[ t_y Q_0 - \frac{nQ_0 - m + \frac{2(SL - Q_0) \ln(SL - Q_0)}{\ln 2}}{r} \right]$$

$$= \frac{\ln p \left[ t_y Q_0 - \frac{nQ_0 - m + \frac{2(SL - Q_0) \ln(SL - Q_0)}{\ln 2}}{r} \right]}{(SL - Q_0) \ln 2} +$$

$$\frac{\ln p \left[ a(g^{Q_0} - 1) \right]}{(SL - Q_0) \ln 2},$$

де  $a = t_1 / (g - 1)$ ;  $r = p^K$ ;  $K = 2 + \log_2 L$ ;  $m = SLn$ ;

$$n = 2(t + \log_2 L) + t_y.$$

Тому для конкретного набору вихідних даних будується залежність  $T_B(Q_0)$  та обґрунтовується раціональна тривалість дефектації, яка мінімізує загальний час відновлення об'єкта для ступеня пошкодження  $S$ , визначеної в процесі попередньої дефектації.

Наприклад, при одиночному пошуку дефектів при

$$\mu = 1; L = 100; S = 0,3; g = 1,1;$$

$$t_1 = 2 \text{ хв}; t_y = 3 \text{ хв}; t = 2 \text{ хв}; p = 0,995$$

отримуємо залежності

$$T_1'(Q_0), T_2'(Q_0) \text{ та } T_B(Q_0),$$

приведені на рис. 1.

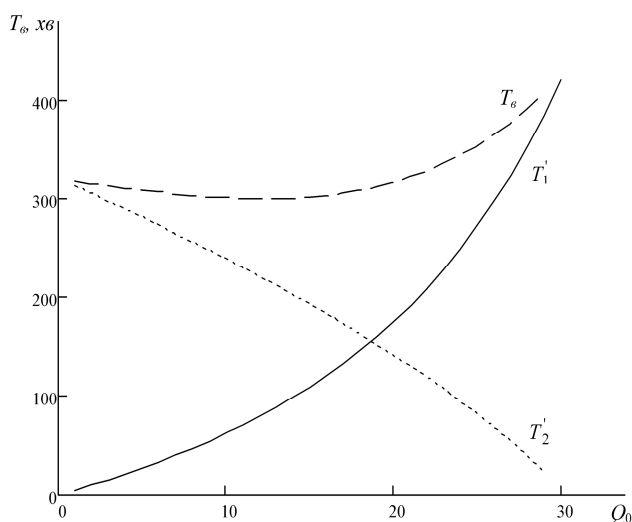


Рис. 1. Залежність часу дефектації, діагностування та відновлення об'єкта при одиночному пошуку дефектів

При цьому загальний час відновлення буде мінімальним, якщо значення  $Q_0$  знаходиться у таких межах:  $Q_0 = 11 \div 15$ .

При тих же вихідних даних спільний груповий пошук дефектів ( $\mu = 2$ ) приводить до результату  $Q_0 = 14 \div 15$  та скорочує час відновлення в 1,8 раз (рис. 2).

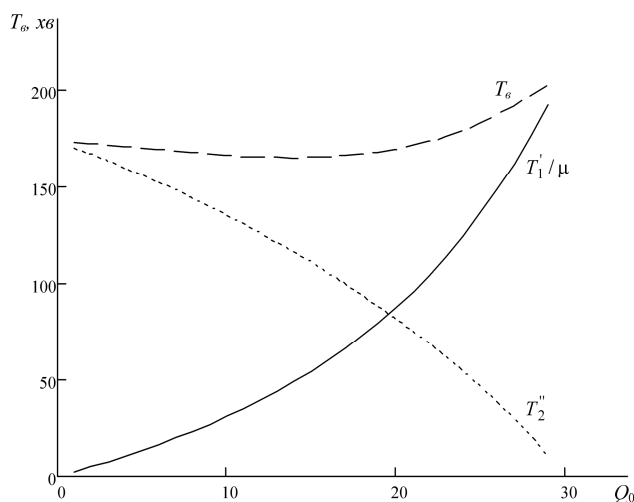


Рис. 2. Залежність часу дефектації, діагностування та відновлення об'єкта при груповому спільному пошуку дефектів

В обох випадках після знаходження та усунення  $Q_0 = 14$  дефектів доцільно припинити дефектацію та переходити до пошуку дефектів, які залишились, в процесі діагностування.

Таким чином, цільова функція процесу ремонту ЗСЗ з кратними дефектами приймає такий вигляд;

$$T_B(L, S, \mu, t_1, t, t_y, g, p) =$$

$$= \min_{Q_0 \leq SL} (T_1(Q_0) + T_2(Q_0)).$$

Загальна структура запропонованої математичної моделі процесу ремонту ЗСЗ з кратними дефектами наведена на рис. 3.

Блок-схема алгоритму знаходження раціональної кількості дефектів, що необхідно усунути під час дефектації, приведена на рис. 4.

Розглянемо використання отриманих результатів в порівнянні з прикладом роботи [4] для відновлення працездатності апаратури каналотворення П-330-6 зі слабким ступенем пошкодження бригадою із 4-х фахівців.

При наявності долі явних дефектів 90% [9] від загальної кількості на їх усунення необхідний час  $0,9SLt_y / 60\mu$  годин.

Апаратура має  $L = 2995$  елементів в 23 блоках та 95 елементів в базовій конструкції.

Запропоновано використовувати зонний пошук кратних дефектів, при цьому середній час відновлення складає  $T_B = 9,36$  годин з яких час дефектації дорівнює  $T_1 = 3$  години.



ЗСЗ і підвищує ефективність роботи ремонтних органів за рахунок збільшення їх пропускної спроможності.

Ефект від використання моделі полягає в мінімізації середнього часу відновлення ЗСЗ з пошкодженнями слабкого ступеня за рахунок раціонального розподілу працевитрат між етапами дефектації та діагностування.

Наукова новизна запропонованої моделі полягає в тому, що вперше враховано вплив якості метрологічного забезпечення на час пошуку кратних дефектів і уточнені функціональні залежності часу дефектації і діагностування ЗСЗ з кратними дефектами.

Достовірність отриманого результату забезпечується:

коректним використанням вихідних даних;

обґрунтованим вибором припущень та обмежень;

врахуванням особливостей етапів відновлення ЗСЗ з кратними дефектами.

Достовірність підтверджується збігом отриманих результатів з відомими [4, 7, 8] і тим, що вони мають зрозуміле фізичне трактування.

## Висновки

1. У результаті аналізу сучасних публікацій в галузі технічної діагностики встановлено напрямок досліджень і сформульована цільова функція процесу ремонту ЗСЗ з кратними дефектами.

2. Запропоновано блок-схему алгоритму реалізації математичної моделі і її структура, що дозволяє мінімізувати середній час відновлення ЗСЗ з кратними дефектами за рахунок перерозподілу зусиль на етапах дефектації і діагностування.

3. Отриману математичну модель в подальшому доцільно використовувати при плануванні роботи ремонтних органів в умовах ведення бойових дій.

## Список літератури

1. Міценко О.Г. *Забезпечення ремонту військової техніки зв'язку агрегатним методом* / О.Г. Міценко // *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ "КПІ"*. – Вип. № 2. – К.: ВІПІ НТУУ "КПІ". – 2002. – С. 68–70.
2. *Керівництво з технічного забезпечення зв'язку та АУВ Збройних Сил України (КТЗЗ та АУВ ЗС України)* / О.М. Іващенко, Ю.І. Катков, В.А. Рижаків та інші. – К.: *Воєнне видавництво*, 2003. – 322 с.
3. Сакович Л.Н., Павлов В.П. *Дефектація техніки зв'язку с аварійними пошкодженнями* // *Зв'язок*. – 2004. – № 7. – С. 52–56.
4. Павлов В.П. *Методики дефектації військової техніки зв'язку при непланових ремонтах* : дис. канд. техн. наук: 20.02.14. – К., 2006. – 182 с.
5. Сакович Л.Н., Вансович Ю.П. *Количественная оценка достоверности диагностирования при устранении аварийных повреждений техники связи* // *Зв'язок*. – 2010. – № 2. – С. 47–49.
6. Сакович Л.Н., Рижаків В.А. *Совместный групповой поиск кратных дефектов при ремонте техники связи* // *Зв'язок*. – 2005. – № 2. – С. 59–62.
7. Романенко В.П. *Методика кількісної оцінки показників якості діагностичного забезпечення ремонту військової техніки зв'язку екіпажем апаратної технічного забезпечення* / В.П. Романенко // *Матеріали наук.-прак. сем. "Інформаційні технології у військовій сфері"*. – К.: *ІТ НУО України*, 2011. – Вип. 5. – С. 12–21.
8. Рижов Є.В. *Методика обґрунтування метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки військового призначення для метрологічного обслуговування військової техніки зв'язку* / М.Ю. Яковлев, Ю.В. Прибілев, Є.В. Рижов // *Труди університету* : зб. наук. праць *НУОУ*. – 2016. – № 2 (123). – С. 65–73.
9. Барда А.П. *Методики разработки диагностического обеспечения военной техники связи* : дис. канд. техн. наук : 20.02.14. – К., 2000. – 189 с.

Надійшла до редколегії 27.02.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Козловський, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТА СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОЙ СВЯЗИ С КРАТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Л.Н. Сакович, В.П. Романенко, И.М. Гиренко

*В статье на основе использования результатов современных исследований в области технической диагностики и метрологии предложена математическая модель количественной оценки среднего времени восстановления средств специальной связи с кратными дефектами, которая учитывает этапы дефектации и поиска дефектов экипажами аппаратных связи или аппаратных технического обеспечения.*

**Ключевые слова:** средства специальной связи, дефектация, поиск кратных дефектов, восстановление работоспособности.

## MODELING THE PROCESS OF SPECIAL COMMUNICATIONS MEANS WITH MULTIPLE DEFECTS MAINTENANCE

L.M. Sakovych, V.P. Romanenko, I.M. Hyrenko

*Based on the results of modern research in the field of technical diagnostics and Metrology, the article suggests mathematical model of quantitative estimation of the average recovery time of special communications means with multiple defects. This model takes into account the stages of fault detection and search defects by communications hardware or hardware technical support crews.*

**Keywords:** special communications means, fault detection, search of multiple defects, means of communications recovery.