

УДК 621.391.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/05>**Сакович Л.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гиренко І.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МІНІМІЗАЦІЯ СЕРЕДНЬОГО ЧАСУ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ІЗ КРАТНИМИ ДЕФЕКТАМИ

Під час ведення бойових дій засоби спеціального зв'язку можуть отримувати пошкодження різного ступеня. Це можливо також при порушенні технології консервації в процесі постановки цих засобів на довготривале зберігання або невідповідності умов зберігання вимогам. В приведених випадках техніка отримує кратні (множинні) дефекти, усунення яких виконують поетапно: спочатку дефектування, а потім діагностування. В статті пропонується підхід до раціонального розподілу зусиль між етапами дефектування і діагностування, що дозволяє мінімізувати середній час відновлення пошкодженої техніки зв'язку. При цьому використані сучасні досягнення в галузі технічної діагностики і метрології, які не враховані у відомих роботах. Отримані функціональні залежності і формалізовано алгоритм визначення часу виконання окремих етапів відновлення працездатності пошкодженої техніки. Приведено приклади використання отриманих результатів.

Встановлено, що під час дефектування зі збільшенням кількості встановлених несправностей працездатності суттєво зростають. При чому час діагностування останніх дефектів зменшується, тобто функція часу відновлення від кількості визначених дефектів має мінімум. Розглядається найгірший випадок – рівномірного розподілу дефектів в об'єкті. Використання ефективної процедури пошуку кратних дефектів сумісно із колективною працею екіпажу апаратної зв'язку і фахівців ремонтного органу за умовними алгоритмами діагностування дозволяє скоротити час відновлення працездатності пошкоджених об'єктів. Аналіз отриманих функціональних залежностей не дозволяє отримати рішення методами дослідження операцій, тому запропоновано знаходження оптимального розподілу часу дефектування і діагностування для мінімізації працездатності відновлення пошкоджених виробів за допомогою ЕОМ за новим алгоритмом. Таким чином, вперше запропоновано формалізацію процесу рішення задачі скорочення середнього часу відновлення засобів з аварійними або бойовими пошкодженнями за рахунок раціонального розподілу зусиль фахівців між етапами дефектування і діагностування. Показано, що при слабкому ступені пошкодження об'єкта загальний час ремонту мінімальний, якщо дефектування складає не більше 40 відсотків від загального часу відновлення.

Ключові слова: засоби спеціального зв'язку, засоби вимірювальної техніки, кратні дефекти, дефектування, діагностування, час відновлення.

Постановка проблеми. Відновлення працездатності засобів спеціального зв'язку (ЗСЗ) із слабким ступенем пошкодження (відмова до 10% елементів) в польових умовах виконують фахівці ремонтних органів на базі апаратних технічного забезпечення (АТЗ) із залученням екіпажу пошкоджених апаратних зв'язку. Тобто одночасно працює група фахівців і необхідно раціонально розподілити їх зусилля для скорочення середнього часу відновлення. Раніше окремо розглядалися процеси дефектування і діагностування, види групового пошуку дефектів бригадою фахівців, а також сумісно процеси дефектування і діагностування, але тільки одним фахівцем. Таким чином

виникає актуальне завдання дослідження діяльності групи фахівців по відновленню ЗСЗ з кратними дефектами, яке не розглядалося раніше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі оптимізації сумісної діяльності групи фахівців під час діагностування розглянуто за умови відсутності помилок фахівців в оцінці результату виконання перевірок і припущень, що засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) завідомо справні [1–3]. Але в [4] показано і кількісно оцінено вплив помилок фахівців на середній час відновлення при абсолютно надійних ЗВТ. Також кількісно оцінено взаємозв'язок надійності ЗВТ і часу виконання робіт щодо відновлення техніки [5, 6].

Питання скорочення часу пошуку кратних дефектів досліджено в, де запропоновано використовувати усічену процедуру пошуку (УПП), яка заключається у виключенні частини перевірок, що ведуть до заздалегідь справної частини виробу. У подальшому цей процес вдалось автоматизувати [7].

У подальшому продовжено дослідження впливу діагностичних помилок на час відновлення техніки з їх кількісною оцінкою, що дозволило обґрунтовано обрати метрологічні характеристики ЗВТ залежно від вимог до часу відновлення ЗСЗ [8-9].

Отримані результати дозволили виконати моделювання процесу ремонту засобів з кратними дефектами та окремо розглянути процес дефектування.

Подальші дослідження було спрямовано на кількісну оцінку часу відновлення ЗСЗ групою фахівців, але без врахування процесу дефектування і метрологічної надійності ЗВТ, що дозволило обґрунтувати стратегію відновлення і формалізувати процедуру дефектування.

Результати досліджень узагальнено в [10], але тільки при відновленні ЗСЗ одним фахівцем. Таким чином, у відомих публікаціях та дослідженнях відсутнє рішення завдання раціонального розподілу зусиль групи фахівців при відновленні ЗСЗ в польових умовах екіпажем АТЗ з врахуванням впливу на час ремонту діагностичних помилок і метрологічної надійності ЗВТ.

Мета статті: дослідити і формалізувати процес перерозподілу зусиль екіпажу АТЗ між етапами дефектування і діагностування для мінімізації середнього часу відновлення ЗСЗ з кратними дефектами.

Викладання основного матеріалу. Задача досягнення поставленої мети вирішується з використанням методів технічної діагностики і метрології. Находження оптимальної стратегії відновлення ЗСЗ з кратними дефектами базується на реалізації цільової функції

$$T_B(X) = \min_{X^* \in \Delta} T_B(X^*),$$

де X – вектор параметрів системи ремонту; X^* – їх значення при вирішенні задачі; Δ – множина припустимих значень параметрів; T_B – середній час відновлення.

Задача вирішується при наступних допущеннях:

- відновлення ЗСЗ в два етапи (дефектування і діагностування);
- усунення дефектів одразу після виявлення;
- ремонт виконує екіпаж АТЗ;
- врахування можливості відмови ЗВТ і помилки фахівців в оцінці результату виконання перевірки;

- розглядається найгірший випадок – рівномірний розподіл дефектів в ЗСЗ;

- кількість майстрів АТЗ обмежена штатним розкладом;

- ремонт в польових умовах ЗСЗ зі слабким ступенем пошкодження (до 10% від загальної кількості елементів);

- вбудовані в ЗСЗ засоби діагностування не використовують внаслідок принципу рівномірного пошкодження, що веде до хибного діагнозу;

- під час пошуку кратних дефектів використовують УПП;

- під час ремонту нові дефекти в ЗСЗ не виникають;

- агрегати та елементи зі складу обмінного фонду АТЗ заздалегідь справні.

На етапі дефектування час визначення кожного наступного дефекту збільшується за законом геометричної прогресії.

$$T_1 = \frac{t_1(g^{Q_0/R} - 1)}{g - 1} + Q_0 \frac{t_y}{R}; Q_0 > R;$$

де t_1 – час визначення першого дефекту;

g – знаменник геометричної прогресії;

Q_0 – кількість виявлених дефектів;

R – кількість фахівців екіпажу АТЗ;

t_y – середній час усунення несправності.

Знаменник геометричної прогресії залежить від кваліфікації фахівців і визначається за аналізом статистичних даних

$$g = r \sqrt[r]{t_r / t_1}; g = \frac{t_{i+1}}{t_i}; i = \overline{1, r};$$

де t_r – час визначення дефекту $r(1 < r \leq Q_0)$.

Відомо, що при отриманні аварійних або бойових пошкоджень ЗСЗ, більшість дефектів мають явний характер: обриви монтажу, руйнування керамічних та скляних деталей. Тому пошук перших дефектів виконують досить швидко, але потім процес сповільнюється (наприклад, мікротріщини печатних плат).

Загальна кількість дефектів у виробу постійна Q і після дефектування під час діагностування необхідно визначити $Q - Q_0$ дефектів. Тобто, зі збільшенням Q_0 час дефектування T_1 також зростає, а час діагностування T_2 зменшується.

Дефектування ЗСЗ заключається у визначенні ступеня пошкодження техніки за зовнішніми ознаками і усуненні несправностей для обґрунтованого висновка про доцільність ремонту, його види і місце виконання.

На другому етапі відновлення працездатності ЗСЗ використовують види групового пошуку дефектів екіпажем АТЗ [10]:

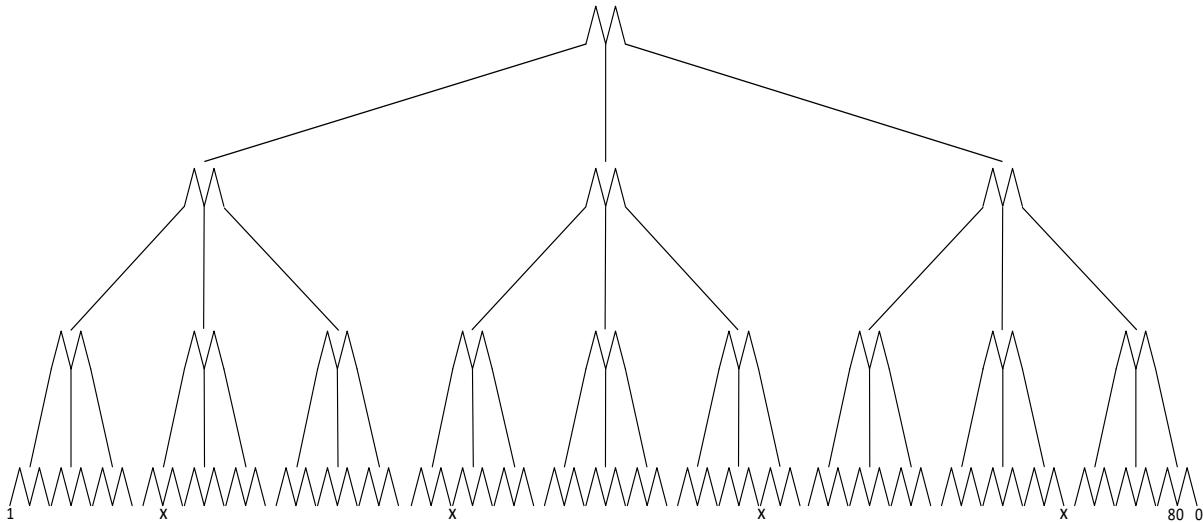


Рис. 1. Алгоритм сумісного групового пошуку дефектів
 ($L = 80, R = 2, Q = 8, Q_0 = 4, K_1 = 4, K_2 = 4, K_3 = 4, K_4 = 4, K = 16$)

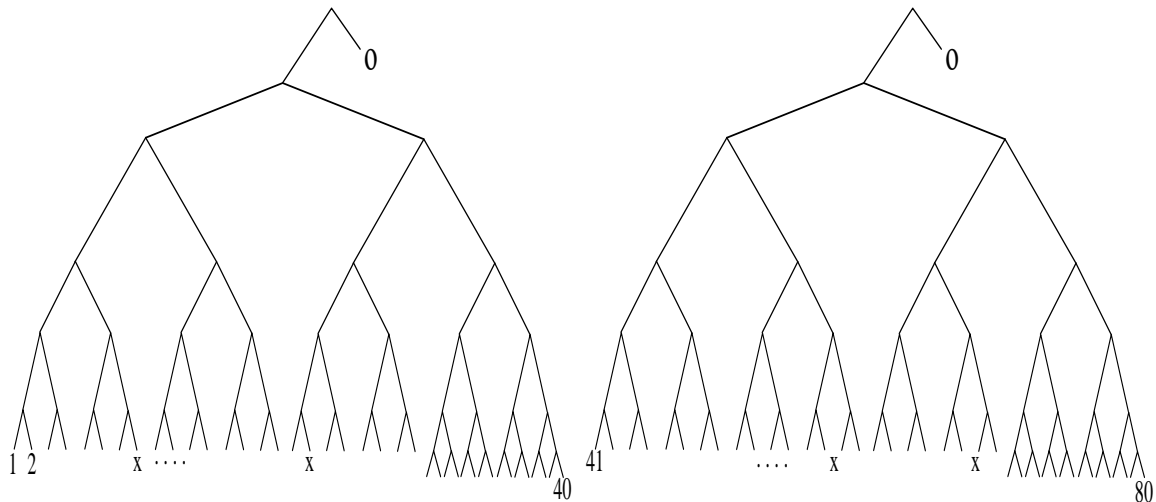


Рис. 2. Алгоритм зонного групового пошуку дефектів ($L = 80, R = 2, m = 2, Q = 8, Q_0 = 4, n = 2, K = 12$)

– сумісний для об’єктів великої розмірності з рознесеними в просторі елементами (наприклад, апаратна або вузол зв’язку);

– зонний при можливості ділення об’єкта на частини, відновлення яких виконують фахівці високої, але вузької спеціалізації (наприклад, радіопередавач великої потужності підрозділяють на зони пошуку: підсистема електроживлення, збуджувач, тракт підсилювання високої частоти).

Приклади умовних алгоритмів діагностування (УАД) групового пошуку дефектів приведено на рисунках:

рис. 1 – сумісний груповий пошук дефектів (L – загальна кількість елементів в об’єкті,

K_i – кількість перевірок для визначення дефекту i , K – загальна кількість перевірок бригадою із R фахівців при визначенні всіх дефектів);

рис. 2 – зонний груповий пошук дефектів (m – модуль вибору УАД, n – кількість груп елементів в УАД, O – відсутність несправностей в об’єкті).

Функціональні залежності для визначення показників якості групового пошуку дефектів з врахуванням допущень приведено в табл. 1.

В таблиці 1 додатково позначено: P_m – метрологічна надійність ЗВТ; P – надійність правильної оцінки результату виконання перевірки; T_B – середній час відновлення ЗСЗ з кратними дефектами.

Оскільки значення T_1 зі збільшенням Q_0 зростає, а T_2 зменшується, то їх сума, тобто T_B ,

Показники якості групового пошуку дефектів

Показники якості	Вид групового пошуку дефектів	
	сумісний	зонний
Кількість груп елементів	$n_c = RL(Q - Q_0) / (L - (Q - Q_0))n(R + 1)$	$n_3 = \frac{(Q - Q_0)L}{R(L - (Q - Q_0))}$
Кількість перевірок	$K_c = (Q - Q_0)(1 + \log_{R+1} \frac{L}{n}) + \frac{n - R - 1}{R}$	$K_3 = 2(\frac{Q - Q_0}{R} - 1) + \frac{Q - Q_0}{R} \log_2(\frac{L}{Q - Q_0} - 1)$
Ймовірність правильного діагнозу	$P_3 = P_m P^{R(1 + \log_{R+1} \frac{L}{n})}$	$P_3 = P_m P^{1 + RK/(Q - Q_0)}$
Час дефектування	$T_1 = \frac{t_1(g^{Q_0/R} - 1)}{g - 1} + Q_0 \frac{t_y}{R}$	$T_1 = \frac{t_1(g^{Q_0/R} - 1)}{g - 1} + Q_0 \frac{t_y}{R}$
Час діагностування	$T_{2c} = \frac{tK + (Q - Q_0)t_y / R}{P_c}$	$T_{23} = \frac{tK + (Q - Q_0)t_y / R}{P_3}$
Середній час відновлення	$T_{BC} = T_1 + T_{2c}$	$T_{B3} = T_1 + T_{23}$

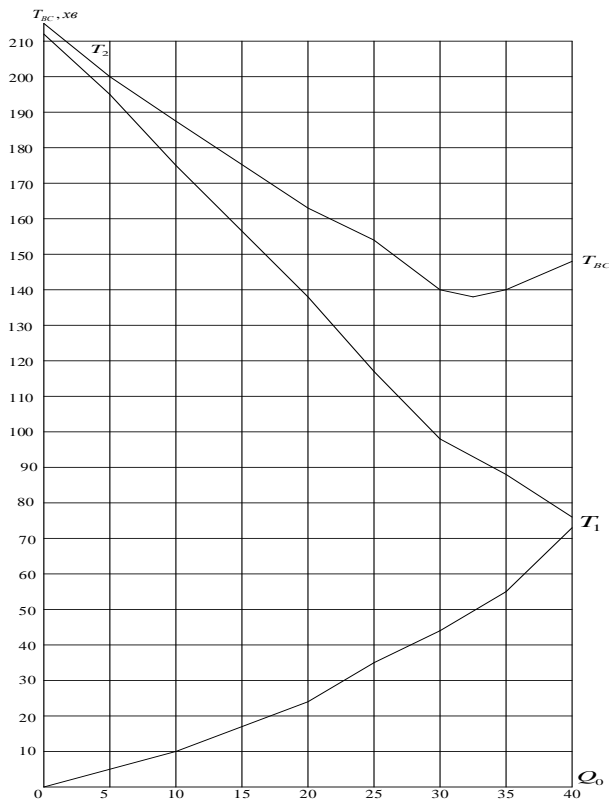


Рис. 3. Залежність середнього часу відновлення об'єкту при груповому сумісному пошуку дефектів від їх числа, встановленого під час дефектування

має мінімум, який необхідно визначити відповідно до цільової функції досліджень.

Для цього можливо використовувати методи дослідження операцій, але отримані трансцендентні рівняння не дозволяють виявити оптимальне значення Q_0 , при якому T_B мінімальне.

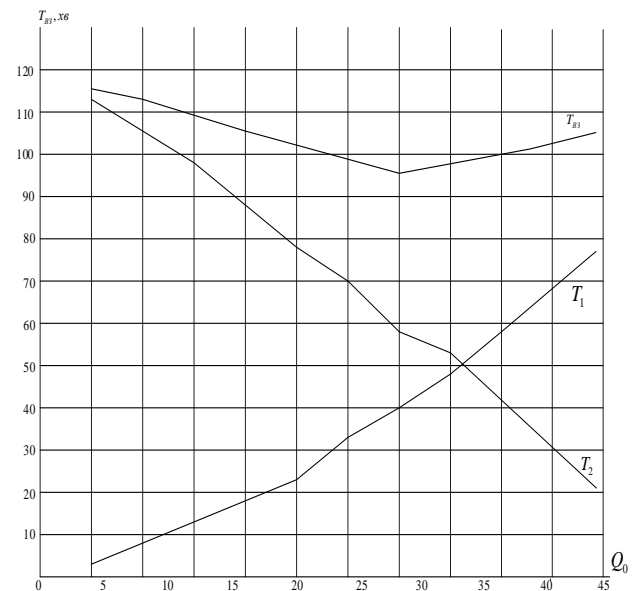


Рис. 4. Залежність середнього часу відновлення об'єкту при груповому зонному пошуку дефектів від їх числа, встановленого під час дефектування

Для сумісного групового пошуку дефектів отримуємо:

$$\frac{dT_{BC}}{dQ_0} = \frac{(FK' - t)P - (FK + (Q - Q_0)t)P'}{P^2 R} + \frac{B}{R} g^{Q_0/R} \ln \frac{1}{R} + C = 0;$$

$$\text{де } K' = \frac{(Q - Q_0)AL}{n(L - (Q - Q_0))^2 \ln(R + 1)} - \log_{R+1} \frac{L}{n} - 1;$$

$$n' = \frac{-AL}{(L - (Q - Q_0))^2}; P' = P_m \frac{P^{Q_0} RAL \ln p}{\ln(R + 1) \cdot n \cdot (L - (Q - Q_0))^2};$$

$$A = \frac{RL}{\ln(R + 1)}; F = \frac{t}{R}; B = \frac{t_1}{g - 1}; C = \frac{t_y}{R};$$

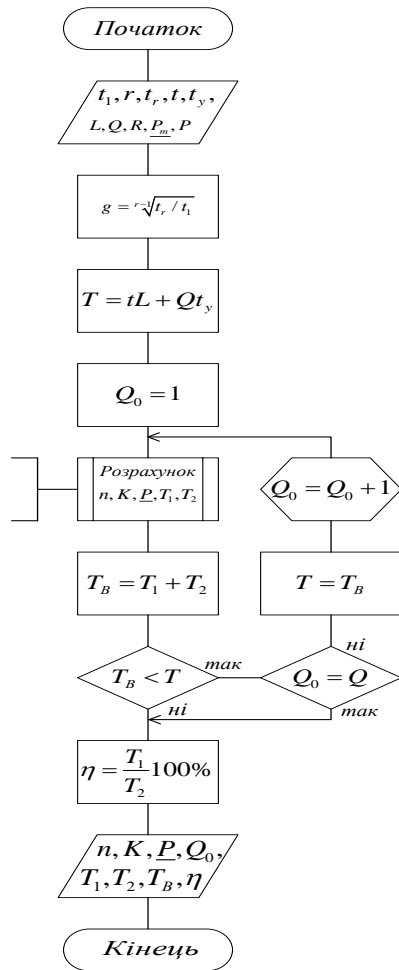


Рис. 5. Алгоритм розрахунку раціонального розподілу часу дефектування і діагностування при усуненні кратних дефектів

а для зонного групового пошуку:

$$\frac{dT_{B2}}{dQ_0} = \frac{(FK' - t)P - (FK + (Q - Q_0)t)P'}{P^2 R^2} + \frac{B}{R} g^{Q_0/R} \ln \frac{1}{R} + C = 0;$$

де $P' = \frac{P_m^{P_1 - RK}}{(Q - Q_0)^2} \frac{K'(Q - Q_0) + K}{R} \ln P;$

$$K' = \frac{1}{R} \left[\frac{L}{(L - (Q - Q_0)) \ln 2} - \log_2 \left(\frac{L}{Q - Q_0} - 1 \right) - 2 \right] - \frac{NL}{(L - (Q - Q_0))^2}.$$

Тому оптимальне значення Q_0 знаходиться прямими обчисленнями. На рис. 3 приведено результати розрахунків для сумісного групового пошуку дефектів при $L = 1000$; $Q = 50$; $R = 4$;

$P = 0,99$; $P_m = 0,95$; $t_1 = 1$ хв; $g = 1,3$; $t = 1$ хв; $t_y = 3$ хв.

У такому разі оптимальне значення $Q_0 = 32$ при дефектування, тоді $T_1 = 50$ хв, $T_2 = 88$ хв, $T_{BC} = 138$ хв, тобто час дефектування складає $(T_1 / T_{BC}) 100\% = 36\%$ від загального часу відновлення.

На рис. 4 для тих же вихідних даних показано результати розрахунків при груповому зонному пошуку дефектів, коли $Q_0 = 28$ хв, $T_1 = 39$ хв, $T_2 = 57$ хв, $T_{BC} = 96$ хв, а час дефектування складає $(T_1 / T_{BC}) 100\% = 41\%$ від загального часу відновлення.

В даному випадку діагностування об'єкту доцільно виконувати груповим зонним пошуком, що скорочує час відновлення в 1,44 рази.

Оскільки не представляється можливим аналітичне рішення визначення оптимального часу дефектування для мінімізації середнього часу відновлення ЗСЗ із кратними дефектами, то пропонується блок-схема алгоритму (рис. 5) рішення цієї задачі за допомогою ЕОМ. Розрахунок виконують окремо для сумісного і зонного пошуку дефектів, потім обирають найкращий варіант. Використання запропонованого процесу формалізації раціонального розподілу зусиль бригади майстрів дозволяє у кожному конкретному випадку залежно від реальних умов ремонту отримувати рекомендації щодо досягнення мінімального часу відновлення працездатності ЗСЗ із кратними дефектами.

Висновки. Отримано аналітичні вирази щодо кількісної оцінки показників якості ремонту техніки з аварійними та бойовими пошкодженнями, які враховують колективну роботу бригади фахівців, метрологічну надійність засобів вимірювальної техніки і можливість діагностичних помилок при аналізі результатів виконання перевірок.

Це дозволяє скоротити середній час відновлення за рахунок раціонального розподілу зусиль фахівців між етапами дефектування і діагностування.

Запропоновано формалізацію процесу розрахунку часу дефектування для мінімізації середнього часу відновлення виробу з кратними дефектами.

Подальші дослідження доцільно направити на можливість використання під час зонного групового пошуку дефектів умовних алгоритмів з модулем вибору більш двох і комплексного використання пошуку видів кратних дефектів.

Список літератури:

1. Локазюк В.М., Савченко О.Г. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК. Київ: Академія. 2004. 376 с.
2. Баболо Ю.Я., Волочий Б.Ю., Лозинський О.Ю. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних та програмних систем. Львів: Львівська політехніка, 2013. 300 с.
3. Василюшин В.І., Женжера С.В., Чепкуй О.В. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с.

4. Кононов В.Б., Водолажко О.В., Коваль С.В. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Харків: ХНУПС, 2017. 288 с.
5. Гнатюк С.Є. Показники надійності систем спеціального зв'язку. *Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації*. 2014. Вип. 25. С. 73–79.
6. Kravchenko V.A. Problems of reliability of electronic components, *Modern Electronic Materials*. 2016. № 1. С. 88–92.
7. Креденцер Б.П. Методика оцінки ефективності застосування автоматичного пристрою діагностування в системі військового ремонту. *Збірник наукових праць*. 2016. № 1. С. 81–86.
8. Кузнецов І.Б., Ябловський П.М. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Київ: НУОУ, 2002. 356 с.
9. Яковлев М.Ю. Підхід до вибору засобів вимірювальної техніки військового призначення для метрологічного обслуговування військової техніки зв'язку. *Військово-технічний збірник*. 2014. № 10. С. 118–127.
10. L. Sakovych, Ye. Ryzhiv, A. Soboliev. Method of time distribution for repair of radio electronic means with multiple defects. *Військово-технічний збірник*. 2019. № 21. С. 72–77.

Sakovych L.M., Gyrenko I.M. MINIMIZING THE AVERAGE RECOVERY TIME OF SPECIAL COMMUNICATIONS EQUIPMENT WITH MULTIPLE DEFECTS

During combat operations, special communications equipment can be damaged to varying degrees. This is also possible if the conservation technology is violated in the process of putting this equipment for long-term storage or if the storage conditions do not meet the requirements. In these cases, the equipment receives multiple defects, the elimination of which is carried out in stages: first, defect detection, and then diagnosis. The article suggests an approach to the rational distribution of efforts between the defect detection and diagnostic stages, which allows minimizing the average time to restore damaged communications equipment. At the same time, modern achievements in the field of technical diagnostics and metrology, which are not taken into account in known works, are used. Functional dependencies are obtained and an algorithm for determining the execution time of individual stages of restoring the damaged equipment performance is formalized. Examples of using the results obtained are given.

It has been established that during defect detection, as the number of detected faults increases, labor costs increase significantly. At the same time, the time required for diagnosing the last defects decreases, i.e., the function of the restoring time on the number of identified defects has a minimum value. The worst-case scenario is considered, with defects distributed evenly in the object. The use of an effective procedure for identifying multiple defects, combined with the teamwork of the hardware communications crew and repair body specialists according to conditional diagnostic algorithms, allows reducing the time to restore damaged objects efficiency. Analysis of the obtained functional dependencies does not allow obtaining a solution using operations research methods, therefore, finding the optimal distribution of defect detection and diagnostic time to minimize labor costs required to restore damaged products is offered using a computer according to a new algorithm. Thus, for the first time, formalization of the process of solving the problem of reducing the average time to restore equipment with emergency or combat damage due to the rational distribution of specialists' efforts between the defect detection and diagnostics stages is suggested. It is shown that with a weak degree of damage to the object, the total repair time is minimal if the defect is no more than 40 percent of the total restore time.

Key words: *means of special communication, means of measuring equipment, multiple defects, defects, diagnostics, recovery time.*