

Л. М. Сакович, Г. Я. Криховецький, І. М. Гиренко, Ю. В. Мирошніченко

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

## МЕТОД РОЗРОБКИ АЛГОРИТМІВ ДІАГНОСТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ

**Анотація.** У статті розглядається можливість використання комплексного показника, що враховує надійність, часові та вартісні показники перевірки окремих підсистем об'єкту великої розмірності для побудови алгоритму його діагностування. Це дозволяє скоротити середній час відновлення комплексу за рахунок першочергової перевірки стану найменш надійних підсистем, які потребують мінімальних працевитрат та вартості на перевірку і відновлення. Також приведено блок-схему реалізації методу, що дозволяє використовувати ЕОМ для автоматизації процесу розробки діагностичного забезпечення перспективних зразків засобів і комплексів спеціального зв'язку. Наведений приклад використання методу та кількісна оцінка ефективності його застосування. Отримані результати в подальшому дозволяють скоротити час і працевитрати на відновлення при поточному ремонті перспективних зразків і комплексів спеціального зв'язку.

**Ключові слова:** радіоелектронні комплекси, засоби спеціального зв'язку, алгоритм діагностування, ймовірність переважного вибору.

### Вступ

Технічна діагностика, як наука, досліджує практично реалізовані методи і методики скорочення часу і вартості локалізації дефектів, підвищення ймовірності знаходження їх місця в несправному об'єкті, але середній час діагностування при поточному ремонті радіоелектронних комплексів (РЕК) складає до 80% часу відновлення їх працездатності [1-7]. Тому завдання підвищення ефективності технічного діагностування засобів спеціального зв'язку завжди є актуальним.

Відомі методи розробки алгоритмів технічного діагностування об'єктів відрізняються і залежать від інформації про його складові частини [1-3]: при наявності тільки структурної схеми об'єкту, доцільно використовувати метод половинного ділення (діхотомію); якщо відомі інтенсивності відмов елементів і час виконання перевірок, то умовний алгоритм діагностування (УАД) виробу розробляють з використанням ймовірності переважного вибору (ЙПВ) перевірок, що значно скорочує середній час пошуку дефектів. Але ці методи не враховують можливість відмови засобів вимірювань (ЗВ), тобто їх метрологічну надійність [4, 7], а також вартість перевірок. Цю обставину враховує комплексний коефіцієнт, який використовують для визначення порядку перевірки РЕК при їх технічному обслуговуванні за станом [8].

**Мета статті** – отримання послідовності перевірок підсистем РЕК для мінімізації часу постановки діагнозу за рахунок першочергової перевірки стану найменш надійних підсистем, які потребують найменших працевитрат і вартості на перевірку та відновлення у вигляді УАД при обмеженнях, що відповідають ремонту РЕК в польових умовах (на склад ЗВ, кількість і кваліфікацію екіпажу).

### Математична постановка завдання

Для математичного опису завдання потрібно сформулювати цільову функцію досліджень. Для

цього необхідно виявити параметр, який треба оптимізувати (в даному випадку це мінімум середнього часу відновлення  $T_e$ ), а також аргументи, що впливають на його значення. При цьому важливо встановити керовані, які можна змінювати, та некеровані змінні. В даному випадку до керованих змінних відноситимуться послідовність і кількість перевірок РЕК за УАД, час їх виконання (залежить від кваліфікації фахівців і ЗВ, що використовують для виконання перевірок). Це також впливає на вартість ремонту в цілому. До некерованих змінних відносяться число підсистем ( $M$ ) РЕК і елементів в них ( $L_i, i = \overline{1, M}$ ), їх надійність ( $z_i$ ), поділ РЕК на конструктивні елементи (підсистеми, блоки, модулі), метрологічні характеристики ЗВ.

До цільової функції висувається ряд вимог [9]: однозначність (наявність екстремуму); відповідність реальному процесу; запис через параметри керування; розробка для головного показника системи; відсутність розривів. При цьому частина аргументів виноситься у вигляді обмежень (ймовірність встановлення дефекту за необхідний час, вартість ЗВ не більш припустимого значення). Таким чином, систему ремонту РЕК можливо описати цільовою функцією у вигляді мінімізації середнього часу відновлення при обмеженнях, що відповідають польовим умовам роботи ремонтних органів:

$$T_e(x) = \min T_e(x^*); x^* \in \Delta,$$

де  $x$  – параметри системи ремонту;  $x^*$  – їх значення при рішенні завдання;  $\Delta$  – область припустимих значень зміни параметрів.

Математична постановка завдання у вигляді цільової функції дозволяє кількісно оцінити ефект від її рішення в якості показника, що виражається у відносних одиницях (відсотках). В такому разі показник ефективності методу розробки алгоритмів діагностування РЕК характеризує відносне зменшення середнього часу відновлення з використанням алгоритму ( $T_e$ ) по відношенню до відомих ( $T_e'$ ) [8]:

$$\eta = \left( T_e' - T_e \right) / T_e' \cdot 100\% .$$

### Структура рішення задачі розробки методу побудови алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів

Метод призначений для розробки УАД РЕК. Його сутність полягає в комплексному обліку показників надійності, вартості і часу перевірки стану елементів (підсистем) об'єкту. Необхідні для реалізації вихідні дані отримують з технічної документації РЕК і результатів дослідної експлуатації: відомості про склад об'єкту; показники надійності окремих підсистем; відомості про ЗВ (вартість, метрологічні характеристики); дані про часові і вартісні показники перевірок підсистем РЕК. Обмеження на використання методу: можливість поділу РЕК на окремі підсистеми; можли-

вість автономної перевірки працездатності окремих підсистем РЕК; реалізація ремонту агрегатним методом; вибір ЗВ зі списку дозволених; відновлення працездатності фахівцями штатного екіпажу.

Припущення при використанні методу: врахування метрологічної надійності ЗВ; комплект ЗВ дозволяє перевірку усіх підсистем і залишається незмінним; кваліфікація фахівців відповідає посаді.

Перераховані обмеження і припущення відповідають умовам поточного ремонту РЕК у військових мобільних апаратних технічного забезпечення. Метод дозволяє обґрунтувати послідовність виконання перевірок РЕК під час діагностування в процесі поточного ремонту штатними екіпажами або із залученням фахівців апаратних технічного забезпечення в польових умовах. Схема реалізації методу приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема реалізації методу розробки алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів

#### Математичний апарат реалізації методу

Розробка УАД РЕК великої розмірності заснована на використанні методів теорії ймовірностей, теорії графів і теорії надійності технічних систем [1-9]. Відносну надійність кожної підсистеми РЕК розраховують за формулою, що характеризує ймовірність відмови підсистеми при відмові виробу

$$p_i = z_i / \sum_{j=1}^M z_j = z_i T ; \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1 ;$$

де  $z_i$  – параметр потоку відмов підсистем;  $T$  – напрацювання РЕК на відмову.

Якщо підсистеми РЕК виконані на однотипній елементній базі, то можливо використовувати вираз:

$$p_i = \frac{L_i}{L} ; \quad L = \sum_{i=1}^M L_i ;$$

де  $L$  – загальна кількість елементів РЕК.

Відносна трудоемність перевірок стану підсистем РЕК дорівнює:

$$\tau_i = t_i / \sum_{j=1}^M t_j ; \quad \sum_{i=1}^M \tau_i = 1 ;$$

де  $t_i$  – трудоемність (час) перевірки параметрів підсистеми  $i$  з врахуванням ймовірності правильної оцінки її результату.

Відносна вартість ЗВ для перевірки параметрів підсистеми  $i$  дорівнює:

$$s_i = C_i / \sum_{j=1}^M C_j ; \quad \sum_{i=1}^M s_i = 1 ;$$

де  $C_i$  – вартість ЗВ для перевірки працездатності підсистеми  $i$ . Відносний час відновлення (заміни або резервування) підсистеми  $i$

$$f_i = t_{ei} / \sum_{j=1}^M t_{ej} ; \quad \sum_{i=1}^M f_i = 1 ;$$

де  $t_{ei}$  – час відновлення підсистеми  $i$ . Для визначення послідовності перевірки підсистем РЕК під час діагностування пропонується кожну підсистему оцінити комплексним показником, що враховує всі розглянуті складові

$$u_i = \frac{p_i P_{zi}}{\tau_i s_i f_i} ; \quad P_{zi} = \prod_{j=1}^{m_i} P_{mj} ;$$

де  $P_{zi}$  – метрологічна надійність ЗВ, що використовують для перевірки підсистеми  $i$ ;  $m_i$  – кількість ЗВ для перевірки підсистеми  $i$ ;  $P_{mj}$  – метрологічна надійність окремих ЗВ для перевірки підсистеми  $i$ . Отримане значення  $u_i$  безрозмірне і суттєво відрізняється для окремих підсистем РЕК, тому доцільно використовувати ЙПВ підсистем

$$U_i = u_i / \sum_{j=1}^M u_j ; \quad \sum_{i=1}^M U_i = 1 .$$

В подальшому з використанням отриманих значень ЙПВ підсистем виконують побудову алгоритму діагностування РЕК у вигляді ДЛМ [1-7].

**Блок-схема реалізації метода побудови алгоритму діагностування**

Реалізація метода формалізована у вигляді блок-схеми, яка наведена на рис. 2. Після отримання вихідних даних окремих підсистем РЕК (2) за відомими методиками [1-7] виконують побудову діагностичної моделі об'єкта у вигляді графа інформаційно-енергетичних зв'язків (ГЕЗ) (3).

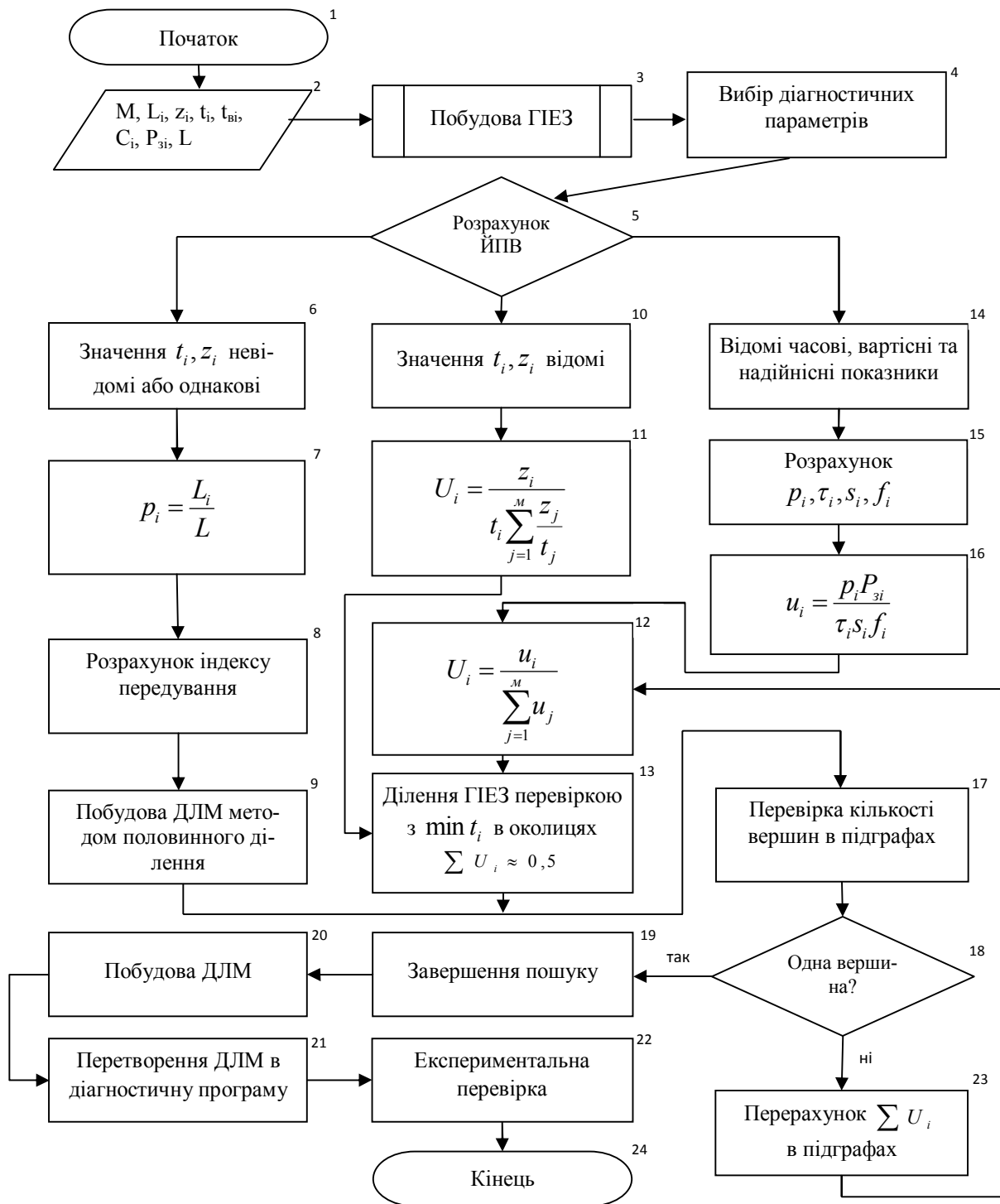


Рис. 2. Блок-схема реалізації метода діагностування радіоелектронних комплексів

При цьому зворотні зв'язки і транзитивні зв'язки розривають. Потім для кожної підсистеми обирають діагностичні параметри (4): переважно вимірювання напруги або опору, а також аналіз форми сигналу за допомогою осцилографа. При поточному ремонті доцільно використовувати можливості вбудованих засобів діагностування.

В подальшому, залежно від обсягу інформації про об'єкт, розрахувати значення ЙПВ (5). При наявності тільки структурної схеми виробу виконують розрахунок індексів передування [1-7] і побудову ДЛМ методом половинного ділення (6-9). При відомих значеннях параметру відмов  $z_i$  і часу перевірки підсистем  $t_i$  розрахунок ЙПВ за рекомендаціями [1-7] (10, 11) з побудовою ДЛМ мінімальної форми за критерієм мінімуму  $T_e$  (13). Якщо відомі часові, вартісні та надійнісні показники підсистем РЕК, то розрахунок комплексного показника (14-16) і ЙПВ (12) кожної підсистеми виробу. В подальшому ділення ПЕЗ перевіркою з мінімальним значенням  $t_i$  в околицях суми  $U_i$  приблизно рівною 0,5 (13). Якщо перевірка кількості вершин в підграфах (17) показує, що вона більше одиниці (18), то виконують перерахунок суми ЙПВ в них (23) і процес продовжується (17). Якщо після виконання чергової перевірки залишається одна вершина (18), то пошук завершується (19) і після побудови ДЛМ (20) з подальшим перетворенням в діагностичну програму (вказівки про місце перевірки, ЗВ, можливі результати її виконання) (21) виконують експериментальну перевірку отриманої діагностичної програми (22).

**Приклад використання запропонованого методу**

Порядок використання методу розглянемо на прикладі РЕК з [8], схема якого наведена на рис. 3.

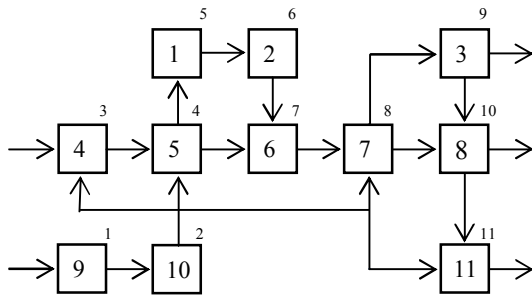


Рис. 3. Схема з'єднання підсистем радіоелектронного комплексу

Вихідні дані і результати проміжних розрахунків приведено в табл. 1 [8]. РЕК складається зі  $M = 11$  підсистем. Необхідно побудувати УАД, що мінімізує середній час відновлення РЕК при поточному ремонті. Результати розрахунку комплексних показників, ЙПВ і рангу ( $R_i$ ) підсистем РЕК приведено в табл. 2 [8]. Ранг підсистем відображає порядок їх перевірки при обслуговуванні РЕК за станом.

Розглянемо можливі варіанти побудови УАД об'єкту. На рис. 3 відображено індекси передування підсистем, тобто кількість підсистем, що впливають на роботу даної плюс одиниця. При відсутності відомостей про надійність, часові та вартісні показ-

ники перевірок побудову УАД виконують методом діхотомії (половинного ділення об'єкту перевірки) з використанням індексу передування. Отриманий таким чином УАД приведено на рис. 4.

Таблиця 1 – Приклад розрахунку показників підсистем радіоелектронного комплексу

$i$	$z_i$	$t_i$	$C_i$	$t_{ei}$	$p_{si}$	$p_i$	$\tau_i$	$s_i$	$f_i$
1	4	15	2500	10	0,85	0,04	0,054	0,123	0,055
2	4	15	2000	12	0,88	0,04	0,065	0,098	0,066
3	10	20	1000	15	0,81	0,10	0,082	0,049	0,083
4	10	20	1200	20	0,79	0,10	0,108	0,059	0,110
5	6	10	1800	11	0,91	0,06	0,059	0,089	0,061
6	7	10	2100	8	0,88	0,07	0,043	0,103	0,044
7	6	10	1200	16	0,93	0,06	0,086	0,059	0,088
8	25	30	1500	25	0,95	0,25	0,145	0,074	0,138
9	4	15	3500	22	0,89	0,04	0,119	0,172	0,121
10	4	15	3000	18	0,87	0,04	0,097	0,148	0,099
11	20	25	500	24	0,88	0,20	0,142	0,026	0,135

Таблиця 2 – Приклад розрахунку показників підсистем радіоелектронного комплексу

$i$	$u_i$	$U_i$	$R_i$
1	93,1	0,0549	8
2	83,7	0,0493	9
3	242,9	0,1432	3
4	112,7	0,0664	7
5	170,4	0,1005	4
6	316,1	0,1863	2
7	125,0	0,0737	6
8	160,4	0,0946	5
9	14,4	0,0085	11
10	24,5	0,0144	10
11	353,1	0,2082	1

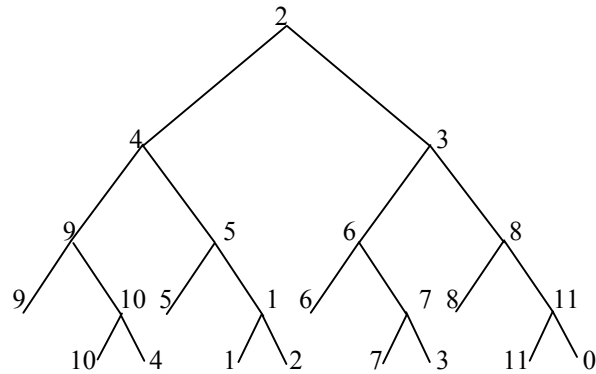


Рис. 4. Умовний алгоритм діагностування об'єкту методом половинного ділення

В такому разі середній час відновлення РЕК дорівнює (з врахуванням справного стану виробу):

$$T_e' = \sum_{i=1}^{M+1} \left( t_{ei} + \sum_{j=1}^{K_i} t_j \right) / (M + 1) = \frac{927}{12} = 77,25 \text{ хв.}$$

Якщо використовувати відомі рекомендації щодо розрахунку ЙПВ і побудови УАД при наявності даних про надійність підсистем і час виконання їх перевірки [1-5] отримуємо алгоритм виду рис. 5.

У цьому випадку отримуємо

$$T_e'' = 912/12 = 76 \text{ хв.,}$$

що краще, ніж раніше на 1,6%.

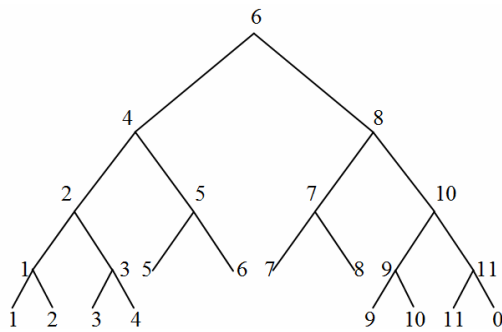


Рис. 5. Умовний алгоритм діагностування, побудований за відомими рекомендаціями

При використанні запропонованого методу отримуємо УАД виду рис. 6, при цьому

$$T_6 = 842/12 = 70,2 \text{ хв.},$$

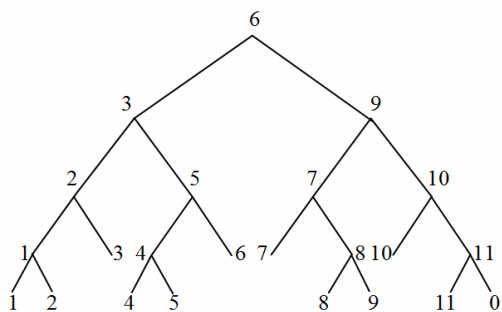


Рис. 6. Алгоритм діагностування, побудований запропонованим методом

що на 7,6% краще, ніж в попередньому випадку, або на 9,1% менше часу відновлення з побудовою УАД методом половинного ділення. В цих випадках середня кількість перевірок при пошуку дефекту дорівнює

$$K = \sum_{i=1}^{M+1} K_i / (M+1) = 3,76.$$

### Висновки

Запропоновано метод розробки умовних алгоритмів діагностування радіоелектронних комплексів на першому етапі поточного ремонту (визначення несправних підсистем або блоків) і порядок його реалізації, що дозволяє скоротити середній час відновлення за рахунок використання комплексного коефіцієнту при оцінці значення ймовірності переважного вибору елементів об'єкту.

Це дозволяє при постійному значенні середньої кількості перевірок за рахунок їх упорядочення до десяти відсотків скоротити середній час відновлення в порівнянні з відомими методами. Отримані результати доцільно використовувати під час розробки діагностичного забезпечення перспективних зразків засобів і комплексів спеціального зв'язку для підвищення ефективності їх поточного ремонту.

Подальші дослідження слід направити на розгляд можливості удосконалення процесу пошуку кратних (множинних) дефектів при відновленні працездатності об'єктів зі слабким ступенем аварійних або бойових пошкоджень в польових умовах фахівцями апаратних технічного забезпечення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольнский А.А., Шаповалов В.Ф. Разработка экспертных систем технического диагностирования средств связи и автоматизации. Киев: КВВИУС, 1987. 225 с
2. Ксёэнз С.П. Основы технической диагностики средств и комплексов связи. Ленинград: ВАС, 1989. 192 с
3. Ксёэнз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. Москва: Радио и связь, 1989. 248 с
4. Ксёэнз С.П., Вольнский А.А., Климентов В.И. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. Ленинград: ВАС, 1990. 336 с
5. Ксёэнз С.П., Полтаржикский М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. Санкт-Петербург: ВАС, 2010. 240 с
6. Kononov V.B., Ryzhov Ye.V., Sakovych L.N. Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2, № 1. P. 91-95. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.17>
7. Ryzhov Ye.V., Sakovych L.N., Vankevych Petro. Optimization of requirements for measuring at metrological service of communication tools. *Measurement Journal of International Measurement Confederation*. 2018. Vol. 123. P. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.03.055>
8. Сакович Л.М., Рижов Є.В., Коротченко Л.А. Методика визначення послідовності перевірки радіоелектронних комплексів при технічному обслуговуванні за станом. Львів: НАСВ, Збірник наукових праць № 22, 2020. С. 119-128
9. Василюшин В.І., Женьєра С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с

Received (Надійшла) 12.02.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.03.2020

### Method of development of diagnosticalgorithms for radio electronic complexes

L. Sakovych, H. Krykhovetskyi, I. Hyrenko, Iu. Myroshnychenko

**Abstract.** The article considers the possibility of using a complex metric that considers the reliability, time, and cost metrics of checking individual subsystems of a large object to construct an algorithm for its diagnosis. This reduces the average recovery time of the complex by prioritizing the least reliable subsystems that require minimal labor and costs for inspection and renewal. A block diagram of a method that allows the use of a computer to automate the process of developing diagnostic support for promising samples of special communications tools and complexes is also provided. An example of how you use the method and how to quantify its effectiveness is given. The results obtained in the future allow us to reduce the time and cost of recovery for the ongoing repair of promising samples and special communication complexes.

**Keywords:** radio-electronic complexes, means of special communication, algorithm of diagnosis, probability of preferred choice.