

УДК 621.396.6

Л.М. САКОВИЧ, канд. техн. наук

(Ін-т спец. зв'язку та захисту інформації Нац. техніч. ун-ту «Київський політехнічний інститут»)

М.Ю. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук (Акад. сухоп. військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів)

ОБГРУНТУВАННЯ МІНІМАЛЬНО НЕОБХІДНОГО ЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ПРАВИЛЬНОЇ ОЦІНКИ РЕЗУЛЬТАТУ ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗВ'ЯЗКУ

Розроблено підхід щодо визначення мінімально необхідного значення ймовірності правильної оцінки результату виконання вимірювань за умовним алгоритмом довільної форми. Отримано аналітичні співвідношення з метою оцінки математичного сподівання відхилення від істинного значення технічного стану, який визначено, в разі метрологічного або технічного обслуговування військової техніки зв'язку, які відрізняються від відомих підвищеною точністю.

Разработан подход к определению минимально необходимого значения вероятности правильной оценки результата выполнения измерений по условному алгоритму произвольной формы. Получены аналитические соотношения для оценки математического ожидания отклонения от истинного значения технического состояния определенного при метрологическом или техническом обслуживании техники связи отличаются от известных повышенной точностью.

Військова техніка зв'язку (ВТЗ) в процесі функціонування може знаходитися в різних станах, які оцінювано кількісними показниками: справний і несправний, працездатний і непрацездатний, критичний і граничний, як це запропоновано в роботі [1]. Оцінка технічного стану ВТЗ проводиться з використанням засобів вимірювальної техніки військового призначення (ЗВТВП) в разі перевірки її працездатності, проведення метрологічного обслуговування (МОБ), технічного обслуговування (ТО) й у процесі поточного ремонту (ПР). Послідовність і порядок проведення вимірювання параметрів у разі МОБ, ТО за станом і ПР ВТЗ залежить від результатів виконання попередніх перевірок і представляється у вигляді умовних алгоритмів (УА) діагностування. За відхиленням значень параметрів за межі норми, здійснюється пошук дефектів із використанням штатних ЗВТВП за програмами, які реалізують УА діагностування. Одним зі завдань проведення метрологічної експертизи ВТЗ є оцінка обґрунтованості вибору ЗВТВП із урахуванням вимог до точності вимірювань. Вартість ЗВТВП залежить від їхніх метрологічних характеристик. Наприклад, зміна класу

точності (K_T) універсальних вольтметрів з 0,02 до 0,002 збільшує їхню вартість у 7,5 разів згідно роботам [2-6]. У разі обґрунтування необхідного значення K_T використовуються ймовірні показники ЗВТВП: ймовірність правильного визначення технічного стану ВТЗ (P), математичне сподівання середнього (ρ) та максимального (ρ_M) відхилення у його визначенні, ймовірність правильної оцінки значення вимірювання параметра (p), яка для застосовуваних в процесі МОБ, ТО і ПР ЗВТВП змінюється в межах від 0,645 до 0,9997, як це зазначено в роботах [2-6].

Мета статті – визначення мінімально необхідного значення p для оцінки зі заданою точністю технічного стану ВТЗ у процесі її МОБ, ТО і ПР у разі пошуку дефектів за УА різного виду й форми.

УА, що застосовуються, розрізняють за видами (бінарні, однорідні, групові) й формами (досконала $F = 1$, мінімальна $F = 2$, довільна $F = 3$, максимальна $F = 4$).

На рис. 1 наведено приклади видів і форми УА:
а) бінарний ($m = 2$) досконалої форми ($K = \log_2 L$);
в) бінарний мінімальної форми (різниця максимальної K_{\max} й мінімальної K_{\min} кількості перевірок дорівнює одиниці);

с) бінарний довільної форми ($K = \frac{1}{L} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} i \cdot l_i$; l_i – кількість результатів пошуку після виконання i перевірок);

д) бінарний максимальної форми ($K_{\min} = 1$; $K_{\max} = \frac{L-1}{m-1}$; $K(m=2) = \frac{(L-1)(L+2)}{2L}$);

е) груповий (одночасна перевірка μ параметрів) довільної форми ($K_{\min} < K < K_{\max}$);

ф) однорідний ($m = 3$) довільної форми.

Застосування групових УА дещо знижує значення ймовірності правильної постановки діагнозу, але значно скорочує середню кількість перевірок і час оцінки технічного стану.

Найбільш досліджено бінарні алгоритми досконалої форми згідно роботи [7], як досить прості та зручні в процесі використання.

В відомих методиках обґрунтування значення K_0 ЗВТВП, як це зазначено в роботах [2-6], із метою обчислення математичного сподівання середнього (ρ) й максимального відхилення (ρ_M) у визначенні технічного стану ВТЗ у разі допущення однієї помилки виконавця в оцінці значення параметра, що перевіряється, для УА будь-якої форми використано функціональні залежності, які

наведено в таблиці, що завищують необхідне значення p і, як наслідок, вартість ЗВТВП, які обрано.

Завищення значення p пояснюється тим, що у разі $m > 2$ передбачалося рівномірне прийняття рішення з будь-якого можливого результату перевірки (наприклад, за відсутності сигналу рівномірно передбачалося ухвалення рішення «більше норми», що на практиці виключено). Ця обставина врахована в роботах [8-10], де отримано більш точні розрахункові вирази для УА досконалої форми (в разі помилки передбачається відхилення в оцінці значення параметра тільки на одну градацію в кожену сторону з ймовірністю $0,5(1-p)$):

$$\rho(m \geq 2) = 0,5 \left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p) p^{K-1}; \quad (1)$$

$$\rho(\mu \geq 1) = 0,5 \left(K + \frac{L-1}{\mu} \right) (1-p) p^{\mu K-1}. \quad (2)$$

Для практичних обчислень з досить високою точністю (похибка не більше 0,2%, коли $K \leq 7$) можна використовувати наближені вирази:

$$\rho(m \geq 2) \approx 0,5 \left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p) (1-(1-p)(K-1));$$

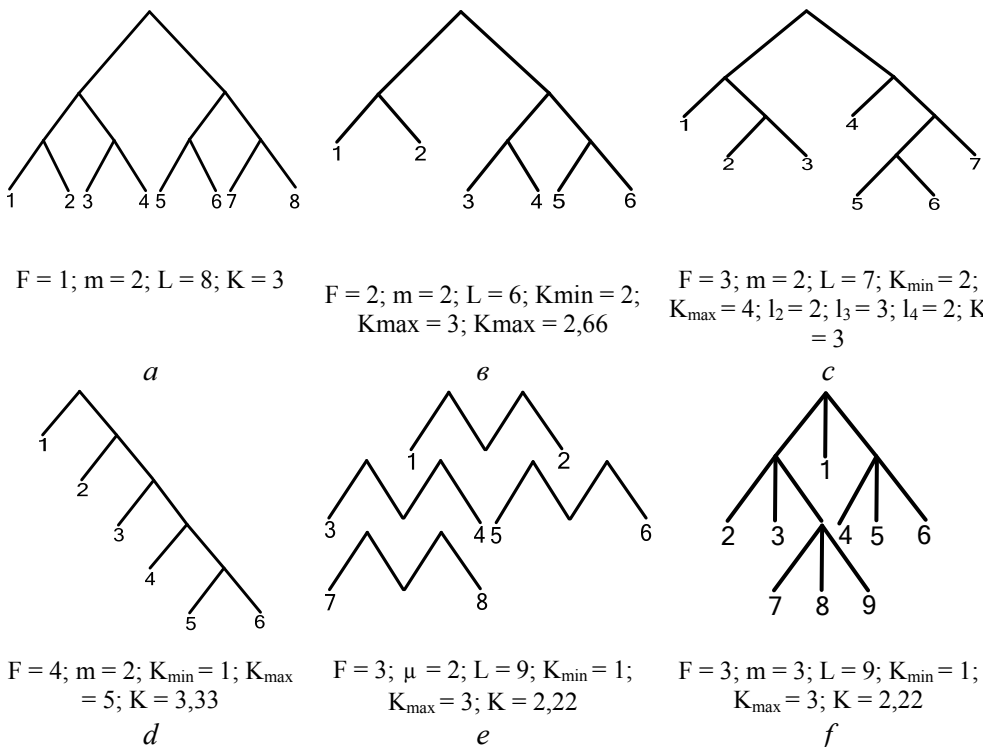


Рис. 1. Приклади видів і форми умовних алгоритмів

Таблиця. Кількісна оцінка відхилення результату визначення технічного стану об'єкта за умовним алгоритмом досконалої форми (F = 1)

Вид алгоритму	Середнє значення відхилення, ρ	Максимальне значення відхилення, ρ_M	K	L	P
Бінарний $m=2$	$0,5(L+K-1)(1-p)p^{K-1}$	$(L-1)(1-p)p^{K-1}$	$\log_2 L$	2^K	p^K
Однорідний $2 \leq m = \text{const}$	$\frac{m-1}{m} \left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p)p^{K-1}$	$\left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p)p^{K-1}$	$\log_m L$	m^K	p^K
Груповий $m=\mu+1$	$\frac{\mu}{\mu+1} \left(K + \frac{L-1}{\mu} \right) (1-p)p^{\mu K-1}$	$\left(K + \frac{L-1}{\mu} \right) (1-p)p^{\mu K-1}$	$\log_{\mu+1} L$	$(\mu+1)^K$	$p^{\mu K}$

$$\rho(\mu \geq 1) \approx 0,5 \left(K + \frac{L-1}{\mu} \right) (1-p)(1-(1-p)(\mu K-1))$$

У загальному випадку в разі допущення декількох помилок в оцінці результатів вимірювань верхня межа можливого відхилення оцінки технічного стану ϵ :

$$\max \rho = 0,5(L+K-1)(1-p^K),$$

де $(1-p^K)$ – ймовірність помилкової оцінки технічного стану об'єкта.

З аналізу виразів (1) і (2) випливає область існування рішень для $0,6 \leq p : \frac{\mu K-1}{\mu K} \leq p \leq 1$.

Очевидно, що зі збільшенням значень μ мінімально допустиме значення p зростає (рис. 2).

Визначимо область існування рішень із метою обчислення мінімально допустимого значення p у процесі оцінки технічного стану ВТЗ за УА досконалої форми. В разі дотримання вимог до можливості реалізації ПР ВТЗ агрегатним методом, коли навіть зроблено помилковий діагноз, несправний елемент

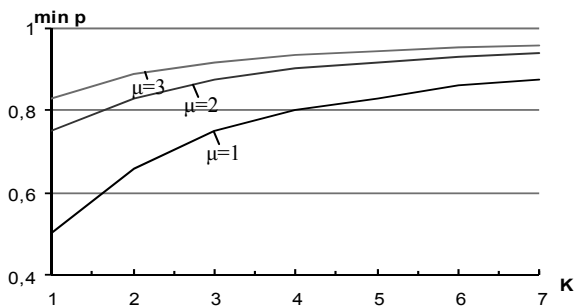


Рис. 2. Визначення мінімально допустимого значення ймовірності правильного оцінювання результату виконання вимірювання

знаходиться в агрегаті, що замінюється (блоці або модулі), як це зазначено в роботах [2-10]:

$$1. \rho \leq 0,5;$$

$$m \geq 2 : (1-p)p^{K-1} \leq \frac{m-1}{K(m-1)+L-1};$$

$$m = \mu + 1 : (1-p)p^{\mu K-1} \leq \frac{\mu}{K\mu + L - 1}.$$

$$2. \rho_M \leq 1,0;$$

$$m \geq 2 : (1-p)p^{K-1} \leq \frac{m-1}{L-1};$$

$$m = \mu + 1 : (1-p)p^{\mu K-1} \leq \frac{\mu}{L-1}.$$

Отже, якщо виконується умова $\rho \leq 0,5$, то умову $\rho_M \leq 1$ можна не перевіряти, так як вона реалізується в разі більшого значення p , ніж у першому випадку.

3. Виконання оцінки технічного стану ВТЗ за допустимий час T_δ . Розрахунковий час визначення технічного стану згідно роботи [7],

$$T = \frac{Kt + t_y}{p} = \frac{Kt + t_y}{p^K},$$

де t – середній час виконання перевірки; t_y – середній час усунення несправностей:

$$T \leq T_\delta : p \geq \left(\frac{Kt + t_y}{T_\delta} \right)^{\frac{1}{K}}.$$

Узагальнюючи результати, які отримано, розроблено блок-схему алгоритму обчислення мінімально необхідного значення p в разі оцінки технічного стану ВТЗ за УА досконалої форми (рис. 3), де Δp – крок зміни значення p .

У роботах [8-10] отримано розрахункові вирази з метою орієнтовної оцінки значення ρ , коли використовується УА довільної форми (F = 3):

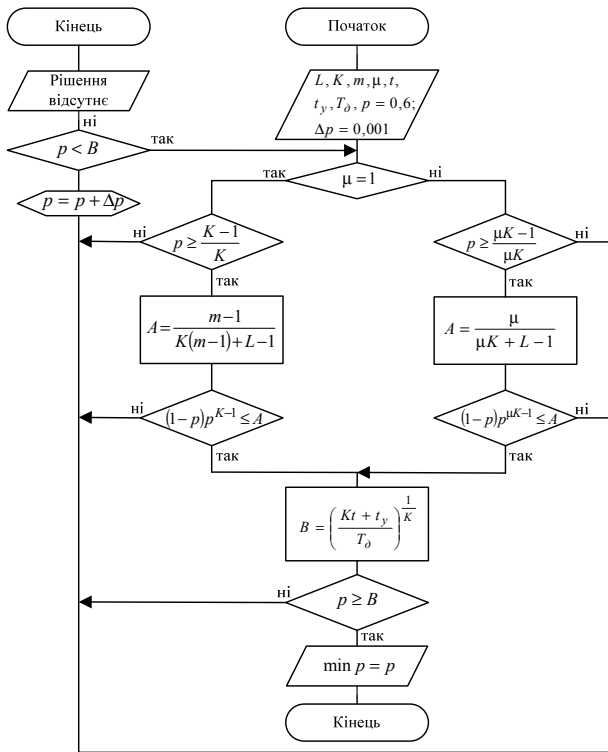


Рис. 3. Блок-схема алгоритму обчислення мінімально необхідного значення ймовірності правильної оцінки результату виконання перевірки для F = 1

$$\rho(m \geq 2) = \frac{1-p}{2(m-1)pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i [m^i + i(m-1)-1] p^i; \quad (3)$$

$$\rho(\mu \geq 1) = \frac{1-p}{2\mu pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i [(\mu+1)^i + i\mu - 1] p^{i\mu}. \quad (4)$$

Подальші дослідження в роботах [11, 12] було спрямовано на отримання більш простих розрахункових виразів введенням припущень $p \approx 1$, що справедливо для цифрових мікропроцесорних ЗВТВП ($p \geq 0,9997$). У такому випадку, коли УА мінімальної форми (F = 2) з відносною похибкою до 4% в разі $m = 2$

$$\rho \approx 0,5(1-p)p^{\lfloor K \rfloor - 1} \left[(2^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor) - (2^{\lfloor K \rfloor} + 1) \frac{l}{L} \right],$$

а для УА максимальної форми (F = 4) з похибкою до 5% у разі $m = 2$

$$\rho \approx \frac{(1-p)(L^2 - 1)}{6} + \frac{p - (2p-1)p^{L-2}}{L};$$

$$\rho_M \approx 0,5L(L-1)(1-p),$$

де $K_{\min} = \lfloor K \rfloor$ – ціла частина числа K ;

$K_{\max} = \lceil K \rceil$ – округлення K до цілого числа.

Комбінаторний аналіз результатів прямих обчислень значень ρ для УА довільної форми (F = 3), який проведено, дозволив отримати аналітичні вирази:

$$\rho(m = 2) = \frac{1-p}{2p} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \frac{l_i (2^i + i - 1) p^i}{2^i}; \quad (5)$$

$$\rho(m \geq 2) = \frac{0,5(1-p)}{p(m-1)} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \frac{l_i (m^i + i(m-1) - 1) p^i}{m^i};$$

$$\rho(m = \mu + 1) = \frac{1-p}{2p\mu} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \frac{l_i [(\mu+1)^i + i\mu - 1] p^{i\mu}}{(\mu+1)^i}.$$

Звідси отримуємо розрахункові вирази для оцінки ρ , коли УА мінімальної форми (F = 2) й коли $K_{\max} - K_{\min} = 1$ і $K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$:

$$\rho(m = 2) = \frac{(1-p)p^{\lfloor K \rfloor - 1} \left[\left(1 + \frac{\lfloor K \rfloor - 1}{2^{\lfloor K \rfloor}} \right) l + \left(1 + \frac{\lfloor K \rfloor}{2^{\lfloor K \rfloor}} \right) (L-l) p \right],$$

де l – кількість станів ВТЗ після виконання K_{\min} перевірок.

Для однорідних УА аналогічним чином отримуємо:

$$\rho(\mu \geq 1) = \left\{ (1-p)p^{\lfloor K \rfloor - 1} [(\mu+1)l + (\mu+1)^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor \mu - 1] + (L-l)[(\mu+1)^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor \mu - 1] p \right\} / 2\mu(\mu+1)^{\lfloor K \rfloor}. \quad (6)$$

З виразів (3) і (4) після підстановки $l_i = m-1$ одержуємо розрахункові формули для оцінки значення ρ для УА максимальної форми (F = 4):

$$\rho(m = 2) = \frac{1-p}{2p} \left[\frac{(1-p^{L-1})p}{1-p} + \sum_{i=1}^{L-1} \frac{i-1}{2^i} p^i \right].$$

При $p \rightarrow 1$: $\rho(m = 2) \approx \frac{1-p}{2p} \left[\frac{1-p^{L-1}}{1-p} + \frac{2^{L-1} - L}{2^{L-1}} \right];$

$$\rho(\mu \geq 1) = \frac{1-p}{2p} \left[\frac{p(1+p^{L-1/\mu})}{1-p} + \sum_{i=1}^{L-1/\mu} \frac{\mu i - 1}{(\mu+1)^i} p^i \right].$$

Порядок застосування результатів, які отримано, розглянемо на прикладі оцінки технічного стану цифро-аналогового об'єкта – тракту прийому станції тропосферного зв'язку Р-423 за УА з роботи [12]: довільної форми (рис. 4 а) для $\mu=1$ і мінімальної форми (рис. 4 б) для $\mu=2$ (перевірка і відновлення працездатності двома майстрами).

Вихідні дані: $L = 5l$; $Td = 25xв$; $t = 3xв$; $t_y = 5xв$.

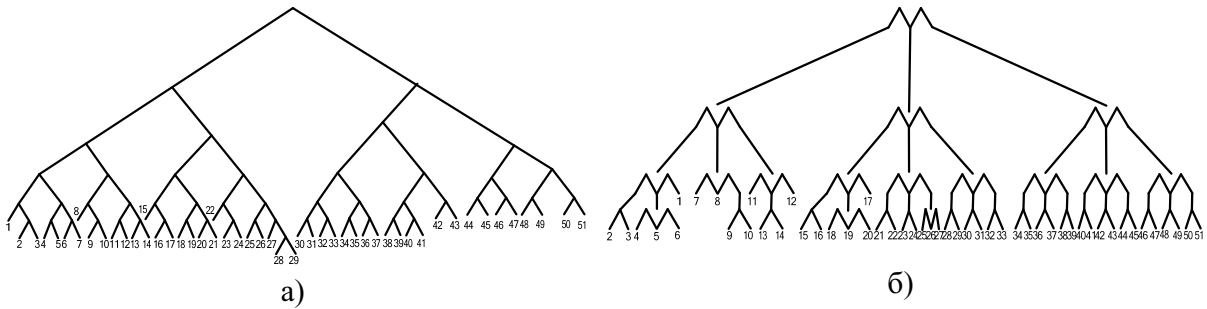


Рис. 4. Умовні бінарні алгоритми оцінки технічного стану

- а) $F = 3; m = 2; \mu = 1; K_{\min} = 5; K = 5,765; K_{\max} = 7; l_5 = 14; l_6 = 35; l_7 = 2;$
- б) $F = 2; \mu = 2; K_{\min} = 3; K = 3,882; K_{\max} = 4; l = 6; L - l = 45.$

Для алгоритму рис. 4 а за виразом (5) отримуємо:

$$\rho = \frac{1-p}{2p} \sum_{i=5}^7 \frac{l_i(2^i + i - 1)}{2^i} p^i = 0,5(1-p)p^4(5,75 + 37,73p + 2,09p^2)$$

Далі з умови $\rho \leq 0,5$ одержуємо нерівність

$$15,75(1-p)(1 + 2,395p + 0,133p^2)p^4 \leq 1,$$

з графічного розв'язку якої слідує мінімально необхідне значення $p \geq 0,98$.

Перевірка умови $T \leq T_\delta = 25xв.$ показує, що значення $p \geq 0,98$ недостатньо:

$$T = \frac{5,765 \cdot 3 + 5}{0,98^{5,765}} = 25,2xв > T_\delta,$$

тому після збільшення значення ймовірності правильної оцінки результату вимірювання параметра до $p = 0,982$, отримуємо $T = 24,9xв < T_\delta$.

В роботі [12] для прикладу, що розглядається, одержано результати:

$$p = 0,995; \rho = 0,273; \rho_M = 0,516.$$

Застосування нових залежностей дозволяє знизити вимоги до метрологічних характеристик ЗВТВП за значенням p на 1,3%.

У другому випадку оцінки технічного стану ВТЗ щодо алгоритму рис. 3 за виразом (6) отримуємо

$$\rho(\mu = 2) = \frac{(1-p)p^2[3 \cdot 6 \cdot (3^3 + 3 \cdot 2 - 1) + 45(3^4 + 4 \cdot 2 - 1)p]}{2 \cdot 2 \cdot 3^4} = (1-p)p^2(1,78 + 12,22p)$$

Далі з умови $\rho \leq 0,5$ визначаємо $p \geq 0,96$.

Перевірка умови $T \leq T_\delta$ показує, що значення $p = 0,96$ достатньо:

$$T = \frac{3,882 \cdot 3 + 5}{0,96^{3,882}} = 19,7xв < T_\delta.$$

Таким чином, встановлено, що в разі оцінки технічного стану тракту прийому станції тропосферного зв'язку Р-423 доцільно використовувати груповий алгоритм рис. 4 в і ЗВТ з $p \geq 0,96$.

Ефект від застосування результатів, які отримано, полягає в зниженні вимог до ЗВТВП за значенням p в порівнянні з методикою-прототипом згідно робіт [2-6, 12] на

$$\eta = \frac{0,995 - 0,96}{0,995} \cdot 100\% = 3,5\%.$$

Розглянемо порядок застосування результатів, які отримано, ще на одному конкретному прикладі – УА визначення технічного стану підсистеми управління функціонуванням радіопередавача великої потужності (рис. 5) згідно роботи [13]. При $p = 0,995$ по відомим виразам отримано $\rho = 0,188$ і $\rho_M = 0,271$. Згідно виразу (5) математичне сподівання відхилення оцінки стану ВТЗ за наявності не більше однієї помилки у визначенні значення параметра становить:

$$\rho = 0,5(1-p)p(2,5 + 1,19p^2 + 1,125p^3 + 5,39p^4 + 5,23p^5 + 2,05p^6)$$

Вихідні дані рис. 5: $F = 3; L = 25; K_{\min} = 2; K = 5,44; K_{\max} = 8; l_2 = 2; l_4 = 1; l_5 = 10; l_6 = 5; l_7 = 5; l_8 = 2.$

З отриманої залежності $\rho(p)$, яку наведено на рис. 6, випливає, що для виконання умови $\rho \leq 0,5$ досить використовувати ЗВТВП зі значеннями $p \geq 0,953$. Крім того, в разі $p \geq 0,995$ справжнє значення $\rho = 0,96$, що на 68% менше отриманого за відомими розрахунковими формулами, які завищують вимоги й вартість використовуваних ЗВТВП, у разі ТО й ПР ВТЗ.

Перевірка $T \leq T_\delta$ у разі $t = 3,5xв., t_y = 5xв., T_\delta = 30xв.$ підтверджує правильність вибору в якості ЗВТВП вольтметра В7-38 із $p = 0,999$, в цьому разі:

$$T = \frac{5,44 \cdot 3,5 + 5}{0,999^{5,44}} = 25xв < T_\delta = 30xв.$$

Застосування вольтметра, який вбудовано ($p = 0,96$), також забезпечує необхідний час оцінки технічного стану:

$$T = \frac{5,44 \cdot 3,5 + 5}{0,96^{5,44}} = 30xв = T_\delta.$$

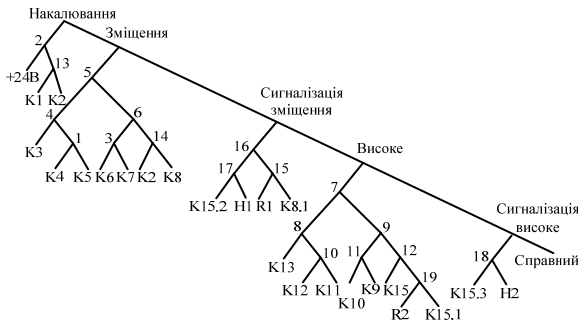


Рис. 5. Умовний алгоритм визначення технічного стану підсистеми управління функціонуванням радіопередавача

Висновки

1. Отримано нові розрахункові вирази з метою кількісної оцінки математичного сподівання відхилення визначеного в разі метрологічного обслуговування, технічного обслуговування або поточного ремонту технічного стану військової техніки зв'язку від його істинного значення, які відрізняються від відомих підвищенням точності результатів.

2. Результати, які отримано, доцільно використовувати в методиках обґрунтування завдання метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки військового призначення під час проведення метрологічної експертизи на етапах проектування та розробки новітньої військової техніки зв'язку, а також для метрологічного обслуговування, технічне обслуговування й у процесі поточного ремонту існуючої військової техніки зв'язку.

3. Достовірність результатів, які отримано, підтверджується використанням математичного апарата, який апробовано, обґрунтованою постановкою завдання й зведенням результатів до відомих в окремих випадках: зворотня підстановка $\mu = m + 1$, $\lfloor K \rfloor = \lceil K \rceil = K$, $l_i = L$, $m = 2$ у разі зміни форми умовних алгоритмів від максимальної до досконалої приведе до отримання вихідних виразів

$$\rho(m \geq 2) = 0,5 \left(K + \frac{L-1}{m-1} \right) (1-p)^{K-1}$$

$$\text{та } \rho(\mu \geq 1) = 0,5 \left(K + \frac{L-1}{\mu} \right) (1-p)^{\mu K-1}$$

адекватність яких підтверджується результатами прямих обчислень.

Список літератури

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996.01.01. – К.: Державний стандарт України, 1996. – 90 с.

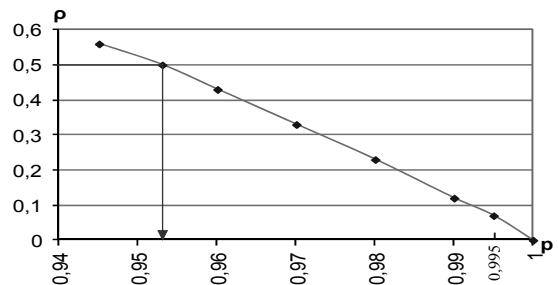


Рис. 6. Залежність $\rho(p)$ для умовного алгоритму рис. 5

2. Сакович Л.Н., Дзюба В.Н., Павлов В.П. Выбор средств измерений согласно требований к ремонтпригодности средств связи // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 23–25.

3. Сакович Л.Н., Дзюба В.Н., Павлов В.П. Определение метрологических характеристик средств измерений для обслуживания и ремонта средств связи // Зв'язок. – 2003. – № 5. – С. 17–19.

4. Яковлев М.Ю. Підхід до вибору засобів вимірювальної техніки військового призначення для метрологічного обслуговування військової техніки зв'язку / М.Ю. Яковлев, Є.В. Рижов // Військово-техн. зб. Академії СВ. – 2014. – № 1(10). – С. 115–121.

5. Рижов Є.В. Визначення впливу ймовірнісних показників засобів вимірювальної техніки військового призначення на точність оцінки стану військової техніки зв'язку / Є.В. Рижов, М.Ю. Яковлев, О.В. Ходич // Десята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору». – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2014. – С. 319–320.

6. Сакович Л., Рыжаков В., Павлов В. Выбор средств измерений для технического обслуживания и текущего ремонта оборудования систем защиты информации // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. Вип. № 7. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – С. 77–85.

7. Ксёиз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.

8. Сакович Л.Н. Вансович Ю.П. Количественная оценка диагностических ошибок при восстановлении работоспособности техники связи // Зв'язок. – 2008. – № 5-6. – С. 58–61.

9. Сакович Л.Н. Вансович Ю.П. Количественная оценка математического ожидания максимального отклонения диагноза // Зв'язок. – 2009. – №3. – С. 47–49.

10. Сакович Л.Н. Вансович Ю.П. Количественная оценка достоверности диагностирования при устранении аварийных повреждений техники связи // Зв'язок. – 2010. – № 2. – С. 47–49.

11. Сакович Л.Н., Романенко В.П. Количественная оценка вероятностных характеристик диагностических ошибок при ремонте техники связи // Зв'язок. – 2011. – № 4. – С. 60–62.

12. Дослідження перспективних напрямків підвищення ефективності системи ремонту засобів спеціального зв'язку та захисту інформації Держспецзв'язку: Звіт про НДР «Пошук» / ІСЗЗІ НТУУ «КПІ». – К., 2013. – 115 с.

13. Рыжаков В.А., Сакович Л.Н. Автоматизация диагностирования средств связи с кратными дефектами // Зв'язок. – 1997. – № 2. – С. 44–46. ового центру Сухопутних військ з наукової роботи.