

УДК 621.391:519.726

Л. М. САКОВИЧ, канд. техн. наук, доцент;

В. П. РОМАНЕНКО, канд. техн. наук

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРУПОВОГО ПОШУКУ ДЕФЕКТІВ ПРИ РЕМОНТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Запропоновано модель процесу групового пошуку дефектів при ремонті техніки зв'язку для досягнення необхідних значень показників якості роботи ремонтних органів. Комплексно розглянуто різні види групового пошуку з кількісною оцінкою ефективності їх використання.

Ключові слова: математична модель; груповий пошук дефектів; показники якості роботи ремонтних органів.

Вступ

Відновлення роботоздатності технічних об'єктів телекомунікаційних систем (ТОТС) як об'єктів великої розмірності — це процес, здійснюваний колективом фахівців. У відомих працях [1–5] розглянуто окремі види групового пошуку дефектів (ГПД). Аналіз цих видів пошуку дозволяє встановити загальні закономірності їх реалізації для підвищення ефективності спільної діяльності колективу фахівців.

Ефективність роботи колективу фахівців характеризується середнім часом T_B відновлення ТОТС, що, у свою чергу, залежить від часу діагностування об'єкта. Як відомо, найбільше часу (60–80%) витрачається на пошук дефектів. Решта (20–40%) часу йде на усунення несправностей, перевірку роботоздатності в усіх режимах, а також, при потребі, на регулювання [1–5]. Отже, резерв підвищення ефективності роботи колективу фахівців, або ремонтного органу (РО), полягає в удосконаленні ремонтпридатності та діагностичного забезпечення (ДЗ) ТОТС на етапах її проектування (модульна конструкція, обґрунтування комплексу штатних засобів вимірювання (ЗВ), раціональне розміщення вбудованих засобів діагностування, формування ЗІП для реалізації ремонту агрегатним методом) і експлуатації (технічна і технологічна документація, підготовка фахівців, упровадження сучасних досягнень технічної діагностики в практику ремонту).

Мета статті — на основі узагальнення здобутих в [1–6] результатів побудувати математичну модель процесу групового пошуку дефектів при ремонті ТОТС, що його здійснює екіпаж апаратної зв'язку (АЗ) або технічного забезпечення (АТЗ) в польових умовах, а також бригада фахівців РО на базі пункту технічного обслуговування та ремонту (ПТОР).

У практиці ремонту ТОТС використовують усі види групового пошуку [3; 4]:

- **незалежний** (ГПДн) — при ремонті різних типів технічних об'єктів в універсальних АТЗ;
- **спільний** (ГПДс) — при ремонті об'єктів великої розмірності з просторово рознесеними елементами;
- **зонний** (ГПДз) — при ремонті однотипних ТОТС модульної конструкції в спеціалізованих АТЗ.

Значення показника якості роботи РО залежить передусім від середнього часу відновлення технічного об'єкта. З огляду на це постає завдання щодо відшукування в явному вигляді, а також дослідження та мінімізації функції $T_B(L, S, R, t, t_v, K, p)$ при заданих обмеженнях, де використано такі позначення:

L — глибина пошуку дефекту (розмірність об'єкта);

S — ступінь аварійних пошкоджень ТОТС;

R — кількість ремонтників;

C — вартість ремонту ТОТС;

t — середній час виконання перевірки;

t_v — середній час усунення несправності;

K — середня кількість перевірок;

p — імовірність правильної оцінки результату перевірки.

Попередній аналіз моделювання процесів ремонту техніки зв'язку [5] не враховує використання всіх видів ГПД, тому доводиться будувати й досліджувати модель ГПД, сутність якої полягатиме у виборі переважного виду ГПД за критерієм мінімуму показників якості ремонту на відновлення роботоздатності ТОТС залежно від допустимих меж зміни параметрів умовних алгоритмів діагностування (УАД) та з урахуванням кількісної оцінки їх імовірнісних характеристик, а саме:

T_B — середнього часу відновлення;

r — математичного сподівання відхилення діагнозу при помилці в оцінці результату виконання перевірки;

ρ_{\max} — максимально можливе значення цього параметра;

C — мінімальної вартості ремонту;

W — загальних трудовитрат на ремонт.

Постановка задачі

Розглядаються три види групового пошуку: *незалежний*, *зонний* і *спільний* — відповідно ГПД_н, ГПД_з, ГПД_с.

$$\text{ГПД} \begin{cases} \text{ГПД}_n \\ \text{ГПД}_z \\ \text{ГПД}_c \end{cases} \text{ при } \begin{cases} W_z < W_c < W_n; \\ T_v \leq T_{v,d}; \\ C \leq C_d; \\ 0,01 < S < 0,2; \\ 1 \leq \mu \leq R; \\ \rho_{\max} \leq 1, \rho \leq 0,5; \\ 0,6 \leq p < 0,9997. \end{cases}$$

Тут $T_{v,d}$ і C_d — відповідно допустимий час відновлення і допустима мінімальна вартість ремонту.

Вихідні дані L, Z, R, p отримуємо з технічного опису ТОТС, а також інструкцій щодо технічної експлуатації, схемної побудови ТОТС, засобів вимірювання (ЗВ), кваліфікації фахівців. Значення K (загальна кількість перевірок), n (кількість груп елементів в алгоритмі пошуку дефектів) і m (модуль вибору перевірок однорідних алгоритмів пошуку) знаходимо з огляду на реалізовані діагностичні процедури (значення Z дорівнює кількості зон пошуку при реалізації ГПД_з).

Розв'язання задачі здійснюється за допущень, які відповідають особливостям функціонування РО, а саме:

- ступінь S пошкодження технічного об'єкта визначається із заданою ймовірністю в результаті дефектації: $0,01 \leq S \leq 0,2$;
- розглядається найгірший із погляду діагностування випадок рівномірного розподілу дефектів в об'єкті;
- у процесі діагностування нових дефектів в об'єкті не виникає;
- організаційні втрати часу не враховуються;
- технологічне обладнання, ЗВ і комплекти ЗПП-0 розглядаються як завідомо справні;
- кваліфікація фахівців відповідає посаді;
- ремонтвана техніка забезпечена комплектом документації.

До керованих змінних при розробці ДЗ ТОТС належать:

K — загальна кількість перевірок для пошуку LS дефектів, яка визначається значеннями L, S, R , видом і формою УАД;

P — ймовірність правильної постановки діагнозу.

Залежно від умов функціонування РО його цільова функція полягає в забезпеченні заданого значення $T_{v,d}$ за мінімальної вартості ремонту C або в мінімізації значення середнього часу відновлення T_v при обмеженнях на ресурси.

Обмеження при використанні моделі:

- ◆ кількість персоналу, що виконує ремонт (екіпаж АЗ і АТЗ в польових умовах або штатний персонал РО у стаціонарних умовах);
- ◆ середній час відновлення — не більший від допустимого;
- ◆ застосування для комплексних об'єктів, що складаються з механічних, радіоелектронних та електричних елементів;
- ◆ розраховано на планово-виробничі відділення стаціонарних і польових РО, а також на науково-дослідні організації і виробничі підприємства при модернізації існуючих та розробці перспективних об'єктів.

Узагальнення функціональних залежностей оптимального значення кількості груп елементів в алгоритмі, мінімального значення загальної кількості перевірок при пошуку всіх дефектів, мінімально необхідної кількості фахівців у групі та інших показників ДЗ [3–5] дозволило отримати в явному вигляді аналітичні вирази для кількісної оцінки показників якості ДЗ ГПД будь-якого вигляду. Ці вирази зведено в табл. 1, що являє собою модель ГПД, де c_i — вартість роботи фахівця кваліфікації i за годину.

Структуру моделі, призначеної для визначення виду ГПД, що має на меті зменшення трудовитрат при відновленні роботоздатності ТОТС, а також задоволення вимог керівного технічного матеріалу (КТМ), унаочнює рисунок.

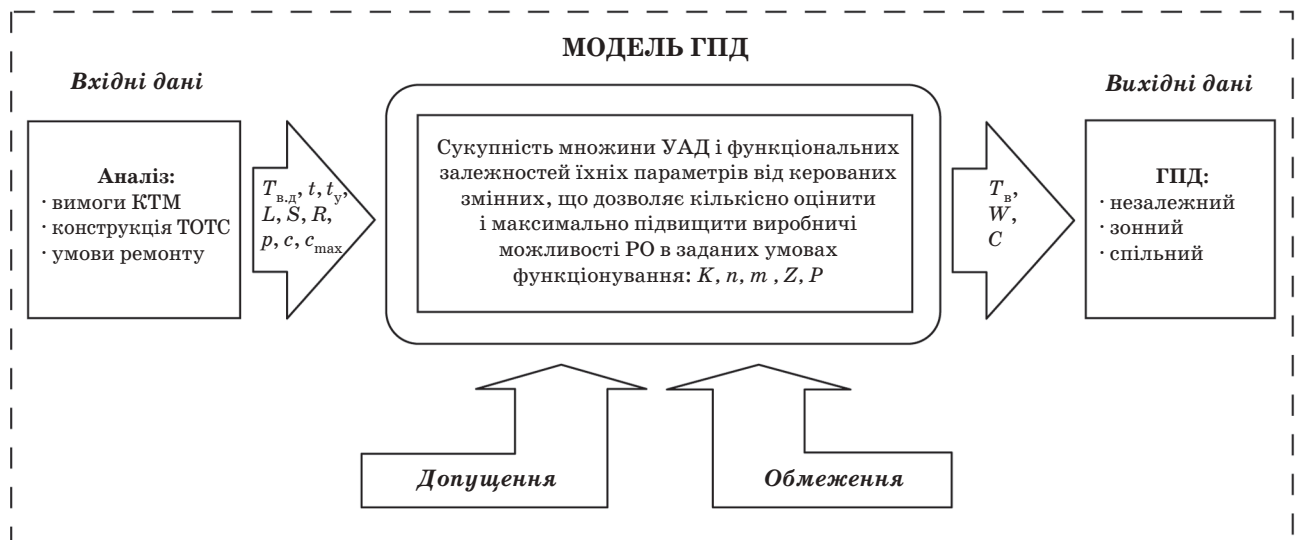
Отже, загальна модель процесу (незалежного, спільного, зонного) ГПД — це сукупність множини УАД, які реалізуються групою фахівців, і функціональних залежностей параметрів і обмежень цих алгоритмів від керованих змінних, що дозволяє кількісно оцінити й максимально підвищити виробничі можливості РО в заданих умовах функціонування.

Множина УАД використовуваних при розробці ДЗ групового пошуку дефектів, може залежно від особливостей схемної побудови технічного об'єкта і ступеня його пошкодження набирати однієї з чотирьох форм:

Таблиця 1

Модель групового пошуку дефектів

Параметр	Вид групового пошуку		
	Незалежний	Зонний	Спільний
$\{\mu, R, Z, K_Z\}$	$\{1, 1, 1, K\}$	$\{1, R, Z, K_Z\}$	$\{\mu, \mu, 1, K\}$
K	$\frac{1-S}{2SL(m-1)^2} \left(\frac{m-1}{1-S} - 1 \right) \left(\frac{m-1}{1-S} + m \right) + 2(SL-1) + SL \log_m \frac{1-S}{S(m-1)}$	$Z(1+K_Z) + SL/Z$	$SL \left(1 + \log_{\mu+1} \frac{L}{n} \right) + \frac{n-\mu-1}{\mu}$
K_Z	-	$\frac{1-S}{2SL(m-1)^2} \left(\frac{m-1}{1-S} - 1 \right) \left(\frac{m-1}{1-S} + m \right) + 2 \left(\frac{SL}{Z} - 1 \right) + \frac{SL}{Z} \log_m \frac{1-S}{S(m-1)}$	-
n	$SL(m-1)/Z(1-S)$		$\mu SL / (1-S) \ln(\mu+1)$
P	$p^{1+ZK_Z/SL}$		$p^{\mu(1+\log_{\mu+1}(L/n))}$
T_B	$(\mu t K + SL t_y) / PR$		
W	$(\mu t K + SL t_y) / P$		
C	$\left[(\mu t K + SL t_y) / P \right] \sum_{i=1}^R c_i$		



Структура моделі групового пошуку дефектів

- 1) незавершеної ($K_{min} < K < K_{max}$);
- 2) досконалої ($K_{min} = K = K_{max}$);
- 3) мінімальної ($K_{max} - K_{min} = 1$);
- 4) максимальної ($K_{min} = 1; K_{max} = L - 1$).

При цьому залежно від використовуваних ЗВ, кваліфікації фахівців та реалізованих діагностичних процедур УАД бувають:

- 1) бінарні ($m = 2$);
- 2) однорідні ($m = const$);
- 3) неоднорідні ($m = var$).

Неоднорідні УАД можуть характеризуватися як спаданням модуля вибору ($m_j \geq m_{j+1}$), так і його зростанням ($m_j \leq m_{j+1}$) при $j = 1, K - 1$.

Аналитичні вирази за кількісною оцінкою значень ρ і ρ_{max} для різних видів групового пошуку дефектів і УАД зведено в табл. 2 для ГПДс і в табл. 3 для ГПД_н та ГПД_з, де M — максимальне значення модуля вибору неоднорідних УАД. При використанні табл. 3 для оцінювання показників групового зонного пошуку дефектів за алгоритмами мінімальної і максимальної форми в розрахункові вирази замість L слід підставляти L/Z , а замість K підставляти K_Z .

Функціональні залежності табл. 2 і 3 справджуються для поточного ремонту ТОТС, за наявності кратних дефектів після отримання аварійних пошкоджень. Ці залежності використовують для оцінювання значень ρ і ρ_{\max} у кожній групі елементів, оскільки при реалізації зрізаної процедури пошуку в УАД за рівномірного розподілу дефектів несправний є не більш як один елемент у групі.

Значення μ , R , Z вибираються згідно з умовами ремонту та особливостями конструкції технічного об'єкта.

Таблиця 2

Кількісна оцінка математичного сподівання відхилення діагнозу в разі однієї помилки фахівця і спільного групового пошуку дефектів

Форма групового УАД	ρ	ρ_{\max}
Досконала	$0,5[K + (L - 1)/\mu]gp^{\mu K - 1}$	$[(L - 1)/\mu]gp^{\mu K - 1}$
Незавершена	$\frac{0,5g}{\mu p L} \sum_{i=1}^{K_{\max}} [(\mu + 1)^i + i\mu - 1] p^{i\mu}$	$\frac{g}{\mu L} \sum_{i=1}^{K_{\max}} [(\mu + 1)^i - 1] p^{i\mu - 1}$
Мінімальна	$(gp^{\mu \lceil K \rceil - 1} / 2L\mu^2) \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil} - L \right] \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil} + (\lceil K \rceil - 1)\mu - 1 \right] \dots$ $\dots p^\mu + (\mu + 1) \left[L - (\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 1} \right] \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil} + \lceil K \rceil \mu - 1 \right]$	$\frac{(\mu + 1)^{\lceil K \rceil} - 1}{\mu} gp^{\mu \lceil K \rceil - 1}$ для $\mu^{\lceil K \rceil - 2} (2\mu + 1) \leq L \leq (\mu + 1)^K$
		$\frac{gp^{\mu \lceil K \rceil - 1}}{\mu^2 (\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 2}} \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil} - 1 \right] \left[L - (\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 1} \right] p +$ $+ \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 1} - 1 \right] \left[(\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 2} + (2\mu + 1) - L \right]$ для $(\mu + 1)^{\lceil K \rceil - 1} \leq L \leq \mu^{\lceil K \rceil - 2} (2\mu + 1)$
Максимальна	$\frac{0,5g}{\mu p L} \left[(\mu + 1)p^{K_{\max}} \left[(\mu + 1)^{K_{\max}} + L - 2 \right] + \mu \sum_{i=1}^{K_{\max} - 1} \left[(\mu + 1)^i + i\mu - 1 \right] p^i \right]$	$(L - \mu)gp^{\mu K_{\max} - 1}$

При усуненні рівномірно розподілених в об'єкті кратних дефектів із реалізацією ГПД₃ у кожній із Z зон міститься по SL/Z дефектів серед L/Z елементів. Для мінімізації загальної кількості перевірок у зоні K_Z при побудові УАД елементи поділяються на n ≈ SL/Z груп, у кожній з яких є не більш ніж один дефект, виявлення якого здійснюється за алгоритмом оптимальної форми після виконання

$$k = \log_2 \frac{L}{Zn} \approx \log_2 \frac{L}{SL} = -\log_2 S$$

перевірок. При знайденому згідно з табл. 1 значенні K_Z дістаємо

$$K_Z = (1 + k) \frac{SL}{Z} + \frac{SL}{Z} = \frac{SL}{Z} (k + 2),$$

звідки

$$k = ZK_Z / SL - 2 = K_Z / n - 2.$$

Тоді значення математичного сподівання відхилення діагнозу за наявності однієї помилки фахівця оцінюються так:

$$\rho = 0,5Sgp^{\lfloor k \rfloor} \left[\left(2^{\lceil k \rceil} - 1/S \right) \left(2^{\lceil k \rceil} + \lceil k \rceil - 2 \right) / p + 2 \left(1/S - 2^{\lfloor k \rfloor} \right) \left(2^{\lceil k \rceil} + \lceil k \rceil - 1 \right) \right];$$

$$\rho_{\max} = (1 - p)(1 - S)p^{k-1} / S.$$

Побудована модель дозволяє порівняти ефективність різних видів реалізації ГПД.

У всіх випадках підвищення кваліфікації сприяє зниженню часу відновлення за рахунок збільшення інтенсивності праці, використання ефективних УАД (неоднорідних із модулем вибору, більшим від двох).

Адекватність моделі — здатність описувати вихідні параметри з відносною похибкою, не більшою від заданого значення [6]. Адекватність моделі перевіряємо на прикладі розробки ДЗ Р-423 за умови спільного пошуку дефектів двома майстрами за таких вихідних даних: L = 51, S = 0,01; p = 0,995; T_{в.д} ≤ 20 хв; t = 3 хв, t_y = 5 хв; m = 2; μ = 2.

Результати перевірки адекватності моделі зведено в табл. 4, аналіз якої показує, що відносна похибка результатів обчислень середнього часу відновлення становить 3,35%, а трудовитрат 5,0%. Цим і підтверджується доцільність використання моделі для оцінювання можливості застосування виду ГПД.

Таблиця 3

Кількісна оцінка математичного сподівання відхилення діагнозу в разі однієї помилки фахівця і пошуку дефектів згідно з УАД

Вид УАД	Форма УАД	
	Незавершена	Мінімальна
Бінарні $m = 2$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i (2^i + i - 1) p^i$	$\left[\frac{(gp)^{\lfloor K \rfloor} / 2L}{\dots p + 2(L - 2 \lfloor K \rfloor) 2^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor - 1} \dots \right]$
Однорідні $m \geq 2$	$\frac{0,5(1-p)}{(m-1)pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i (m^i + i(m-1) - 1) p^i$	$\left[\frac{(gp)^{\lfloor K \rfloor} / 2L(m-1)^2}{\dots p + m(L - m \lfloor K \rfloor) m^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor (m-1) - 1} \dots \right]$
Групові $m = \mu + 1$	$\frac{0,5(1-p)}{\mu pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i (\mu + 1)^i + i\mu - 1 p^i$	$\left[\frac{(gp)^{\mu \lfloor K \rfloor - 1} / 2L \mu^2}{\dots p + (\mu + 1)^{\lfloor K \rfloor} + (\lfloor K \rfloor - 1)\mu - 1} \dots \right] \times$ $\times (\mu + 1)^{\lfloor K \rfloor} + \lfloor K \rfloor \mu - 1$
Неоднорідні $m_i = m_{i+1} + 1$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} l_i \left[t + \sum_{j=1}^i p^j \right] p^i$	$\frac{(gp)^{\lfloor K \rfloor}}{2L} \left[\frac{(1 + \lfloor K \rfloor)^{\lfloor K \rfloor - L}}{\dots p + (2L - (1 + \lfloor K \rfloor))! \left[\lfloor K \rfloor + \sum_{j=1}^{\lfloor K \rfloor} j! \right]} \right]$

$$\frac{0,5(1-p)}{pL} \left[\frac{(2^L + 2L - 4)p^{L-1} + \sum_{i=1}^{L-2} (2^i + i)p^i - p(1-p)^{L-2}}{1-p} \right]$$

$K_{\max} = L - 1$

$$\frac{0,5(1-p)}{(m-1)pL} \left[\frac{mp^{K_{\max}} (m^{K_{\max}} + L - 2) + \sum_{i=1}^{K_{\max}-1} (m^i + i(m-1) - 1)p^i}{K_{\max} - 1} \right]$$

$K_{\max} = (L-1)/(m-1)$

$$\frac{0,5(1-p)}{\mu pL} \left[\frac{(\mu + 1)p^{K_{\max}} (\mu + 1)^{K_{\max}} + L - 2 + \sum_{i=1}^{K_{\max}-1} ((\mu + 1)^i + i\mu - 1)p^i}{K_{\max} - 1} \right]$$

$K_{\max} = (L-1)/M$

$$\frac{0,5(1-p)}{pL} \left[\frac{2 \left(M - 1 + \sum_{j=1}^{M-1} j! p^{M-1} + \sum_{j=1}^{M-2} (M-j) i + \sum_{j=1}^i j! p^i \right)}{K_{\max} - 1} \right]$$

Таблиця 4

Результати перевірки адекватності моделі групового пошуку дефектів

Вид пошуку	P	T _в , хв	W, людино-год
ГПД _c - прототип	0,931	17,9	0,6
ГПД _н	0,944	24,0	0,4
ГПД _б	0,944	20,3	0,67
ГПД _c	0,911	17,3	0,57

Невідповідність результатів моделювання (наявність похибки) показникам якості ДЗ пояснюється тим, що модель зорієнтована на використання однорідного алгоритму, а насправді залежно від особливостей конкретного об'єкта можливе використання неоднорідних алгоритмів. У розглянутому прикладі незалежний і зонний пошук не відповідають умовам відновлення $T_{\text{в}} > T_{\text{в.д}}$. Крім того, конструкція об'єкта практично не дозволяє реалізувати зонний пошук.

Висновки

Використання моделі дозволяє до початку розробки конкретного алгоритму пошуку кількісно оцінити можливі показники якості процесу пошуку.

◆ Ефект від використання моделі полягає в скороченні трудовитрат на розробку ДЗ за рахунок того, що для вибору виду ГПД немає необхідності в розробці алгоритму пошуку для кожного з них. Адже можна заздалегідь оцінити з необхідною точністю показники їхньої якості і вибрати найбільш переважний за заданим критерієм.

◆ Наукова новизна моделі полягає в отриманні спільних аналітичних виразів для кількісної оцінки показників якості будь-якого виду ГПД.

◆ Уперше реалізовано перевірку можливості використання всіх видів ГПД для виконання ремонту агрегатним методом за рахунок кількісного оцінювання відхилення діагнозу при помилці виконавця.

◆ Результати моделювання дозволяють кількісно оцінити показники якості ДЗ різних видів групового пошуку і залежно від постановки задачі оптимізувати кількість ремонтників і параметри УАД. Уперше комплексно розглянуто різні види групового пошуку з кількісною оцінкою ефективності їх використання.

◆ Здобуті результати доцільно використовувати в методиці розробки діагностичних програм ГПД при ремонті ТОТС екіпажами АТЗ у польових умовах.

Література

1. Давыдов, П. С. *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем* / П. С. Давыдов.— М.: Радио и связь, 1988.— 256 с.
2. Ксёэнз, С. П. *Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств* / Ксёэнз С. П.— М.: Радио и связь, 1989.— 248 с.
3. Рыжаков, В. А. *Групповой зонный поиск кратных дефектов при ремонте техники связи* / В. А. Рыжаков, Л. Н. Сакович // Зв'язок.— 2005.— №1.— С. 57–60.
4. Сакович, Л. Н. *Совместный групповой поиск кратных дефектов при ремонте техники связи* / Л. Н. Сакович, В. А. Рыжаков // Зв'язок.— 2005.— №2.— С. 59–62.
5. Сакович, Л. Н. *Определение численности специалистов при восстановлении работоспособности техники связи с аварийными повреждениями* / Л. Н. Сакович, Р. А. Бобро // Зв'язок.— 2006.— №1.— С. 41–44.
6. Томачевський, В. М. *Моделювання систем* / В. М. Томачевський.— К.: Вид. група ВHV, 2007.— 352 с.

Л. Н. Сакович, В. П. Романенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРУППОВОГО ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ПРИ РЕМОНТЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предложена модель процесса группового поиска дефектов при ремонте техники связи для достижения необходимых значений показателей качества работы ремонтных органов. Комплексно рассмотрены разные виды группового поиска с количественной оценкой эффективности их использования.

Ключевые слова: математическая модель; групповой поиск дефектов; показатели качества работы ремонтных органов.

L. M. Sakovych, V. P. Romanenko

THE PROCESS OF MODELING AREA SEARCH OF FAULT LOCATION IN THE REPAIR OF TECHNICAL OBJECTS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

The model of the process of area search of fault location in the repair of communication equipment to achieve the required level of work-quality indicators, which were done by repair agency are viewed. Different forms of area search mechanisms and quantitative assessment of the effectiveness of their usage are considered.

Keywords: mathematical model; area search of fault location; quality metrics of work by repair agency.