

УДК 621.396.6

В.П. РОМАНЕНКО, інж. Л.М. САКОВИЧ, канд.техн.наук.

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

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГРУПОВОГО ПОШУКУ ДЕФЕКТІВ ПІД ЧАС РЕМОНТУ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано модель процесу групового пошуку дефектів у разі ремонту техніки зв'язку для досягнення необхідних значень показників якості роботи ремонтних органів, комплексно розглянуто різні види групового пошуку з кількісною оцінкою ефективності їхнього використання.

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.

Відновлення працездатності військової техніки зв'язку (ВТЗ), як об'єктів великої розмірності, здійснюється групою фахівців. У відомих роботах [1–6] розглянуто окремі види групового пошуку дефектів (ГПД), аналіз яких дозволяє встановити загальні закономірності їхньої реалізації для підвищення ефективності спільної діяльності колективу фахівців.

Ефективність роботи колективу фахівців характеризується $T_{\text{в}}$ — середнім часом відновлення ВТЗ, який у свою чергу залежить від часу діагностування об'єкта. Відомо, що до 60–80 витрачається на пошук дефектів, а 20–40 % на усунення несправностей, перевірку працездатності у всіх режимах і за необхідністю регулювання [1–6]. Отже, резерв підвищення ефективності роботи колективу фахівців або ремонтного органу (РО) полягає у вдосконаленні ремонтпридатності й діагностичного забезпечення (ДЗ) ВТЗ на етапах її проектування (модульна конструкція, обґрунтування комплексу штатних засобів вимірювань (ЗВ), раціональне розміщення вбудованих засобів діагностування, формування ЗІП (для реалізації ремонту агрегатним методом) й експлуатації (технічна та технологічна документація, підготовка фахівців, впровадження сучасних досягнень технічної діагностики в практику військового ремонту).

Мета статті — на основі узагальнень, які отримано в попередніх роботах [1–8], створити модель процесу групового пошуку дефектів під час ремонту ВТЗ екіпажем апаратної зв'язку (АЗ) або технічного забезпечення (АТЗ) в польових умовах, а також бригадою фахівців РО на базі пункту технічного обслуговування та ремонту (ПТОР) [5, 6].

У практиці ремонту ВТЗ знаходять використання всі види групового пошуку [3, 4]:

- незалежний (ГПДн) — у разі ремонту різних типів технічних об'єктів в універсальних АТЗ;
- спільний (ГПДс) — у разі ремонту об'єктів великої розмірності з просторово рознесеними елементами;
- зонний (ГПДз) — у разі ремонту однотипових ВТЗ модульної конструкції у спеціалізованих АТЗ.

Значення показника якості роботи РО визначається головним чином середнім часом відновлення технічного об'єкту, тобто виникає завдання здобуття в явному вигляді, дослідження й мінімізації функції $T_{\text{в}}(L, S, R, C, t, t_{\text{y}}, K, p)$ у разі заданих обмеженостей, де: L — глибина пошуку дефекту (розмірність об'єкту); S — ступінь пошкодження ВТЗ; R — число ремонтників; C — вартість ремонту ВТЗ; t — середній час виконання перевірки; t_{y} — середній час усунення несправності; K — середнє число перевірок; p — ймовірність правильної оцінки результату перевірки.

© В.П. РОМАНЕНКО, Л.М. САКОВИЧ, 2014

Враховуючи попередній аналіз моделювання процесів ремонту ВТЗ [6], де не присутні всі види ГПД, постає необхідність створення відповідної моделі. Сутність моделі полягатиме у виборі переважного виду ГПД за критерієм мінімуму показників якості ремонту на відновлення працездатності ВТЗ у залежності від допустимих меж зміни параметрів умовних алгоритмів діагностування (УАД) із врахуванням кількісної оцінки їхніх характеристик імовірності [7, 8]: T_v — середній час відновлення; ρ — математичне сподівання відхилення діагнозу за помилки в оцінці результату виконання перевірки; ρ_{\max} — максимально можливе значення цього параметру; C — мінімальна вартість ремонту; W — загальні трудовитрати на ремонт.

Постановка задачі: вибір виду ГПД у разі обмеження на умови ремонту

$$\text{ГПД} \begin{cases} \text{ГПДн} \\ \text{ГПДэ} \\ \text{ГПДс} \end{cases} \text{ при } \begin{cases} W_z < W_c < W_n; \\ T_v \leq T_{\text{вд}}; \\ C \leq C_d; \\ 0,01 < S < 0,2; \\ 1 \leq \mu \leq R; \\ \rho_{\max} \leq 1, \rho \leq 0,5; \\ 0,6 \leq p < 0,999. \end{cases}$$

Вихідні дані: L, Z, R, p — із технічного опису ВТЗ, інструкцій із технічної експлуатації, схемної побудови ВТЗ, засобів вимірювання, кваліфікації фахівців; K, n, m — діагностичні процедури, що реалізуються; Z — число зон пошуку у разі реалізації ГПДз, n — число груп елементів в алгоритмі пошуку дефектів; m — модуль вибору перевірок однорідних алгоритмів пошуку.

Завдання вирішується в разі допущень, які відповідні особливостям функціонування РО:

- ступінь пошкодження технічного об'єкту S визначається зі заданою ймовірністю в результаті дефектації: $0,01 \leq S \leq 0,2$ [6];
- розглядається найгірший із позицій діагностування випадок рівномірного розподілу дефектів у об'єкті;
- під час діагностування нових дефектів у об'єкті не виникає;
- організаційні втрати часу не враховано;

- технологічне обладнання, ЗВ і комплекти ЗІП-0 завідомо справні;

- кваліфікація фахівців відповідає посаді;
- відремонтовану техніку забезпечено комплектом документації.

До керованих змінних за розробки ДЗ ВТЗ відносяться: K — загальне число перевірок для пошуку LS дефектів, яке визначається значеннями L, S, R , видом і формою УАД; P — імовірність правильної постановки діагнозу.

Залежно від умов функціонування РО його цільова функція полягає в мирний час у забезпеченні заданого значення $T_{\text{вд}}$ у разі мінімальної вартості ремонту C або у військовий час у мінімізації значення середнього часу відновлення T_v за обмеження на ресурси [6].

Обмеження у разі використання моделі: кількість персоналу, що виконує ремонт (μ) — екіпаж АЗ та АТЗ (у польових умовах);

- штатний персонал РО (в стаціонарних умовах);
- середній час відновлення — не більше допустимого;
- застосування для комплексних об'єктів, які складаються з механізмів, радіоелектронних та електричних елементів;
- розраховано на планово-виробничі відділення стаціонарних і польових РО та науково-дослідні організації і підприємства-виробники у разі модернізації існуючих та розробці перспективних об'єктів.

Узагальнення функціональних залежностей оптимального значення числа груп елементів у алгоритмі, мінімального значення загального числа перевірок у разі пошуку всіх дефектів, мінімально необхідного числа фахівців у групі й інших показників ДЗ [3–8] дозволило отримати в явному вигляді аналітичні вирази для кількісної оцінки показників якості ДЗ ГПД будь-якого вигляду, які зведено в табл. 1, що є моделлю ГПД, де c_i — вартість роботи фахівця кваліфікації i за годину. Структуру моделі приведено на рисунку.

Модель призначено для визначення виду ГПД із метою зменшення трудовитрат у разі

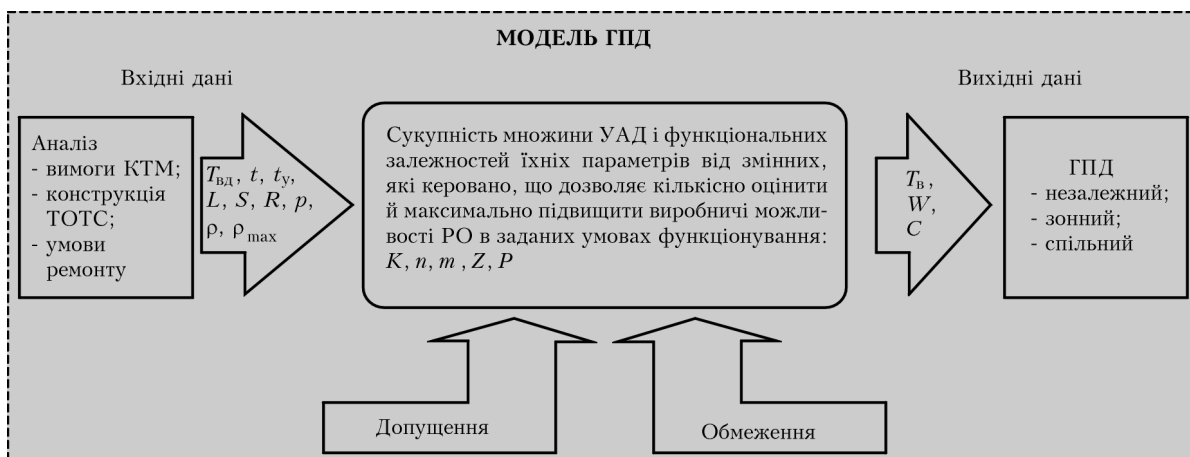
Таблиця 1. Модель групового пошуку дефектів

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

відновлення працездатності ВТЗ і задоволення вимог керівного технічного матеріалу з ремонтпридатності.

З врахуванням міркувань, які приведено, їх загальна модель процесу (незалежного, спільного, зонного) ГПД є сукупністю множини УАД, які реалізуються групою фахівців, і функціональних залежностей їхніх змінних параметрів та обмежень, які керовано, що дозволяє кількісно оцінити й максимально підвищити виробничі можливості РО в заданих умовах функціонування.

Множина, яку використано за розробки ДЗ групового пошуку дефектів УАД, розподіляється залежно від особливостей схемної побудови технічного об'єкту й ступеню його пошкодження за формою: незавершена ($K_{\min} < K < K_{\max}$); досконала ($K_{\min} = K = K_{\max}$); мінімальна ($K_{\max} - K_{\min} = 1$); максимальна ($K_{\min} = 1; K_{\max} = L - 1$) й залежно від ЗВ, які використовуються, кваліфікації фахівців, діагностичних процедур, що реалізуються, їхнього виду: бінарні ($m = 2$), однорідні ($m = \text{const}$), неоднорідні ($m = \text{var}$).



Структура моделі групового пошуку дефектів

Таблиця 2. Кількісна оцінка математичного сподівання відхилення діагнозу за однією помилкою фахівця й спільному груповому 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	$\frac{0,5g}{\mu p L} \sum_{i=1}^{K_{\max}} l_i [(\mu - 1)^i + i\mu - 1] p^{i\mu}$	$\frac{g}{\mu L} \sum_{i=1}^{60} \mu p K_{\max} l_i ((\mu + 1)^i - 1) p^{i\mu - 1}$
Мінімальна	$(gp^{\mu[K] - 1} / 2L\mu^2) [((\mu + 1)^{[K]} - L) \times ((\mu + 1)^{[K] - 1} \mu - 1) + ((\mu + 1)^{[K]} + [K]\mu - 1)]$	$((\mu + 1)^{[K]} - 1) gp^{\mu[K] - 1} / \mu$ для $\mu^{[K] - 2}(2\mu + 1) \ll (\mu + 1)^K$
		$\frac{gp^{\mu[K] - 1}}{\mu^2(\mu + 1)^{[K] - 2}} [((\mu + 1)^{[K]} - L) - (\mu + 1)^{[K] - 1} p + ((\mu + 1)^{[K] - 1} - 1)((\mu + 1)^{[K] - 2}(2\mu + 1) - L)]$ для $(\mu + 1)^{[K] - 1} \leq L \leq \mu^{[K] - 2}(2\mu + 1)$
Максимальна	$\frac{0,5g}{\mu p L} [(\mu = 1)p^{K_{\max}}((\mu + 1)^{K_{\max}} + L - 2)] + \mu \sum_{i=1}^K 1 ((\mu + 1)^i + i\mu - 1) p^i$	$(L - \mu)gp^{\mu K_{\max} - 1}$

Неоднорідні УАД можуть бути як з убунням модуля вибору $m_j \geq m_{j+1}$, так і з його збільшенням $m_j \leq m_{j+1}$ де $j = 1, K - 1$

Аналитичні вирази за кількісною оцінкою значень ρ і ρ_{\max} для різних видів групового пошуку дефектів й УАД за даними [9] зведено в табл. 2 для ГПДс і табл. 3 для ГПДн і ГПДз, де M – максимальне значення модуля вибору неоднорідних УАД.

У разі використання табл. 3 для оцінки показників групового зонного пошуку дефектів за алгоритмами мінімальної і максимальної форми в розрахункові вирази замість L слід підставляти L/Z , а замість $K - K_Z$.

Функціональні залежності табл. 2 і 3 справедливі для поточного ремонту ВТЗ, за наявності кратних дефектів їх використовують для оцінки значень ρ і ρ_{\max} у кожній групі елементів, оскільки в разі реалізації усіченої процедури пошуку в УАД за рівномірним розподілом дефектів вони несправні й налічують не більше одного елемента в групі.

Значення μ, R, Z вибираються, виходячи з умов ремонту й конструкції технічного об'єкту.

За усунення кратних дефектів, які рівномірно розподілено в об'єкті, з реалізацією ГПДз в кожній із Z зон міститься по SL/Z дефектів серед L/Z елементів. Для мініміза-

ції загального числа перевірок у зоні K_Z , у разі побудови УАД, елементи поділяються на $n \approx SL/Z$ груп, в кожній із яких не більше за один дефект, який виявляють за алгоритмом оптимальної форми, після виконання $k = \log_2 \times \frac{L}{Zn} \approx \log_2 \frac{L}{SL} = -\log_2 S$ перевірок. У разі виначеного за табл. 1 значення K_Z , отримуємо $K_Z = (1 + k) \frac{SL}{Z} + \frac{SL}{Z} = \frac{SL}{Z} (k + 2)$.

У такому разі значення математичного сподівання (МС) відхилення діагнозу за однієї помилки фахівця оцінюються за виразами

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

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

Модель, яку отримано, дозволяє порівняти ефективність різних видів реалізації ГПД.

Розглянемо вплив кваліфікації виконавців на час і вартість ремонту для різних видів ГПД за тих же умов: $L = 1000; S = 0,04; p = 0,995; Z = 20; m = 2; R = 4; \mu = 2$, але при низькій кваліфікації $c = 5$ грн/год; $t = 3$ хв; $t_y = 5$ хв, а при високій кваліфікації $c = 10$ грн/год; $t = 1,5$ хв; $t_y = 2,5$ хв. У всіх випадках підвищення кваліфікації веде до зниження час відновлення за рахунок збільшення інтенсивності праці, використання

Таблиця 3. Кількісна оцінка математичного сподівання відхилення діагнозу (ρ) у разі однієї помилки фахівця й пошуку дефектів за УАД

Вид УАД \ Форма УАД	Незавершена	Мінімальна	Максимальна
Бінарні $m = 2$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \times l_i (2^i + i - 1) p^i$	$(gp^{[K]}/2L) \left[\frac{gp^{[K]}/2L(2^{[K]} + [K] - 2) +}{+ p + 2(L - 2^{[K]})(2^{[K]} + [K] - 1)} \right]$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \times \left[\frac{(2^L + 2L - 4)p^{L-1} +}{+ \sum_{i=1}^{K_{\max}} (2^i + i)p^i - \frac{p(1-p^{L-2})}{1-p}} \right]$ $K_{\max} = L - 1$
Однорідні $m \geq 2$	$\frac{0,5(1-p)}{(m-1)pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \times l_i (m^i + i(m-1)) p^i$	$\times \left[\frac{(gp^{[K]}/2L(m-1)^2) \times}{(m^{[K]} - L)(m^{[K]} + [K](m-1) - m) \div}{\div p + m(L - m^{[K]})(m^{[K]} + [K](m-1) - 1)} \right]$	$\frac{0,5(1-p)}{(m-1)pL} \times \left[mp^{K_{\max}}(m^{K_{\max}+1}L - 2) + \right]$ $\times \left[(m-1) \sum_{i=1}^{K_{\max}} (m^i + i(m-1) - 1) p^i \right]$ $K_{\max} = (L-1)/(m-1)$
Групові $m = \mu + 1$	$\frac{0,5(1-p)}{\mu pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \times l_i [(\mu + 1)^i + i\mu - 1] p^{i\mu}$	$\left(\frac{gp^{\mu[K]-1}/2L\mu^2}{\left(\frac{((\mu + 1)^{[K]} + ([K] - 1)\mu - 1) \div}{\div (p^\mu + (\mu + 1)(L - (\mu + 1)^{[K]})} \right)} \right) \times \left(\frac{((\mu + 1)^{[K]} + [K]\mu - 1)}{\right)$	$\frac{0,5(1-p)}{\mu pL} \times \left[(\mu + 1) p^{K_{\max}} ((\mu + 1)^{K_{\max} + L - 2} + \right]$ $\times \left[\mu \sum_{i=1}^{K_{\max}} ((\mu + 1)^i + i\mu - 1) p^i \right]$ $K_{\max} = (L-1)/\mu$
Неоднорідні $m_i = m_{i+1} + 1$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \sum_{i=K_{\min}}^{K_{\max}} \times l_i \left[i + \sum_{j=1}^i j! \right] p^i$	$\frac{gp^{[K]}}{2L} \times \left[\frac{((1 + [K])! - L) \left([K] - 1 + \sum_{j=1}^{[K]} j! \right) \div}{\div p + (2L - (1 + [K])!) \left([K] + \sum_{j=1}^{[K]} j! \right)} \right]$	$\frac{0,5(1-p)}{pL} \times \left[\frac{2 \left(M - 1 + \sum_{j=1}^{M-1} j! \right) p^{M-1} +}{+ \sum_{j=1}^{M-2} (M - j) \left(i + \sum_{j=1}^i j! \right) p^i} \right]$

ефективних УАД (неоднорідних із модулем вибору більше двох).

Адекватність моделі — здатність описувати вихідні параметри з відносною похибкою не більше заданого значення [10]. Адекватність моделі перевіряємо на прикладі розробки ДЗ Р-423 за умови спільного пошуку дефектів двома майстрами за наступних вихідних даних: $L = 51$; $S = 0,01$; $p = 0,995$; $T_{\text{вд}} \leq 20$ хв; $t = 3$ хв; $t_y = 5$ хв; $\mu = 2$.

Результати перевірки адекватності моделі зведені в табл. 4, аналіз якої показує, що відносна похибка результатів обчислень середнього часу відновлення $\delta T_{\text{в}} = 3,35$ %, а трудовитрат $\delta W = 5,0$ %, це й підтверджує доцільність використання моделі для оцінки можливості застосування виду ГПД.

Невідповідність результатів моделювання (наявність похибки) показникам якості ДЗ пояснюється тим, що модель орієнтовано на використання однорідного алгоритму, а реально в залежності від особливостей конкретного об'єкту можливе використання неоднорідних алгоритмів. У прикладі, що розглядається, незалежний і зонний пошук не відповідають умовам відновлення $T_{\text{в}} > T_{\text{вд}}$. Крім

Таблиця 4. Результати перевірки адекватності моделі групового пошуку дефектів

Вид пошуку		P	$T_{\text{в}}$, хв	W , чол. год
ГПДС [6]		0,931	17,9	0,6
Результати моделювання	ГПДН	0,944	24,0	0,4
	ГПДЗ	0,944	20,3	0,67
	ГПДС	0,911	17,3	0,57

того, конструкція об'єкта практично не дозволяє реалізувати зонний пошук.

Висновки

Таким чином, використання моделі дозволяє до розробки конкретного алгоритму пошуку кількісно оцінити можливі показники якості процесу пошуку.

Ефект від використання моделі заключається в скороченні трудовитрат на розробку ДЗ за рахунок того, що для вибору виду ГПД відсутня необхідність розробки алгоритму пошуку для кожного з них тому, що можливо 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.

Крім того, вперше реалізована перевірка можливості використання всіх видів ГПД для виконання ремонту агрегатним методом за рахунок кількісної оцінки відхилення діагнозу в разі помилки діагноста.

Результати моделювання дозволяють кількісно оцінити показники якості ДЗ різних видів групового пошуку й залежно від постановки задачі оптимізувати число ремонтників і параметри УАД. У статті вперше комплексно розглянуто різні види групового пошуку з кількісною оцінкою ефективності їхнього використання. Отримані результати доцільно

використовувати в методиці розробки діагностичних програм ГПД у разі ремонту ВТЗ екіпажами АТЗ у польових умовах. —

Список літератури

1. *Давыдов П.С.* Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П.С. Давыдов. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.
2. *Ксёиз С.П.* Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств / С.П. Ксёиз. — 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. *Рыжаков В.А.* Кількісне оцінювання діагностичних помилок під час поточного ремонту техніки зв'язку / В.А. Рыжаков, Л.М. Сакович // Зв'язок. — 2005. — № 3. — С. 45–50.
7. *Сакович Л.Н.* Количественная оценка вероятностных характеристик диагностических ошибок при ремонте техники связи / Л.Н. Сакович, В.П. Романенко // Зв'язок. — 2011. — № 4. — С. 60–62.
8. *Сакович Л.Н.* Моделирование процессу групового пошуку дефектів під час ремонту техніки зв'язку / Л.Н. Сакович, В.П. Романенко // Зв'язок. — 2011. — № 4. — С. 60–62.
9. *Сакович Л.Н., Вансович Ю.П.* Количественная оценка достоверности диагностирования при устранении аварийных повреждений техники связи / Л.Н. Сакович, Ю.П. Вансович // Зв'язок. — 2010. — № 2. — С. 47–49.
10. *Томачевский В.М.* Моделирование систем / В.М. Томачевский. — К.: Видавнича група ВНУ, 2007. — 352 с.