

ЩЕБЛИКІНА О. В., асистентка,
КАМЕНЄВ О. Ю., к.т.н., доцент,
ЛАПКО А. О., к.т.н., доцент,
САГАЙДАЧНИЙ В. Г., аспірант
(Український державний університет залізничного транспорту)

Підвищення показників готовності та відновлення систем керування рухом поїздів на основі збільшення глибини контролю

Безперервність процесів перевезень залізничним транспортом визначається експлуатаційною надійністю систем керування рухом поїздів. Одними з найважливіших параметрів, що визначають працездатність і справність систем керування, їхню експлуатаційну придатність до регулювання руху поїздів і виконання маневрової роботи, є готовність та здатність до відновлення. Вони визначаються коефіцієнтами готовності і інтенсивністю відновлення відповідно. З метою підвищення цих показників в опублікованому дослідженні, спираючись на останні наукові досягнення, розроблено модель оцінювання глибини контролю функціональних параметрів систем керування рухом поїздів, що здійснюються шляхом функціональних випробувань. На підставі наукових даних, які визначають взаємозв'язок між коефіцієнтом готовності, інтенсивністю відновлення технічних засобів і глибиною їх контролю, встановлено закономірності, що визначають збільшення експлуатаційної готовності та показників відновлення систем керування руху поїздів при зміні масштабності та складності технологічних об'єктів. Розроблено метод, яких дозволяє на основі збільшення глибини контролю досягти підвищення експлуатаційної готовності та параметра відновлення систем керування рухом поїздів відповідно до 30 % і до шести разів. З урахуванням кореляції між відмовами пристроїв керування рухом поїздів і їх затримками зазначені результати дозволяють зменшити непродуктивний простій поїздів до 15 %.

Ключові слова: системи керування рухом поїздів, надійність, готовність, відновлення, глибина контролю, тестове покриття, функціональні випробування.

Вступ

Національною транспортною стратегією України визначено основні напрями розвитку залізничного транспорту до 2030 року. Серед них запровадження комплексних систем цифровізації залізничних перевезень, безперервність яких безпосередньо залежить від надійності функціонування систем керування рухом поїздів (СКРП). Одними з ключових факторів надійності є експлуатаційна готовність і здатність до відновлення систем керування, актуальність забезпечення яких зростає при впровадженні мікропроцесорних засобів залізничної автоматики.

Постановка проблеми

Вирішальне значення в забезпеченні експлуатаційної готовності систем керування відіграє реалізація ефективного контролю функціональних параметрів таких систем. Основні її показники – коефіцієнт готовності та інтенсивність відновлення – безпосередньо впливають із якості виконаного контролю, що пояснюється виявленням та усуненням недоліків систем (відмов,

помилки, дефектів) у процесі його виконання. Таким чином, вдосконалення методів, моделей і засобів контролю функціональних параметрів СКРП є дієвим шляхом до підвищення рівня експлуатаційної готовності систем, а отже, забезпечення надійної та безперервної роботи залізничного транспорту [2–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика контролю функціональних параметрів систем керування відповідальними технологічними процесами охоплена в працях багатьох вітчизняних і закордонних науковців. Зокрема в роботі [5] розглянуто математичні моделі, спрямовані на підвищення швидкостей руху транспортних засобів за рахунок оперативного контролю параметрів надійності відповідних систем регулювання. При цьому відновлення активних модулів керування, що діагностовані в передвідмовному стані, здійснюється на базі ковзного резервування – шляхом за діяння неактивних модулів, що визначаються програмно-апаратними датчиками контролю.

© О. В. Щєбликіна, О. Ю. Каменєв, А. О. Лапко, В. Г. Сагайдачний, 2020

У науковій праці [6] опрацьовано питання верифікації параметрів надійності та безпеки функціонування систем автоматизації розподілених об'єктів керування шляхом дослідження їх моделей, побудованих на базі мереж Петрі та ранжирування пріоритетів відновлення. Результати роботи можуть застосовуватися в засобах прогнозування експлуатаційної надійності будь-яких систем, у тому числі мікроелектронних СКРП.

У роботі [7] розглянуто комплексну проблему забезпечення надійності, у тому числі готовності, та убезпечення функціонування СКРП на залізницях ЄС. Значна увага в роботі приділена методам моделювання технологічних процесів, які дозволяють визначити експлуатаційну готовність СКРП та забезпечити її на належному рівні з використанням неруйнівного контролю функціональних параметрів на базі апарату нечіткої логіки.

У роботі [8] приділено увагу контролю функціональних параметрів СКРП на етапі їх ремонту, при реалізації якого забезпечуються належні показники відновлення та експлуатаційної готовності систем.

Роботи [9, 10] спрямовані на вдосконалення підходів до верифікації та валідації мікропроцесорних СКРП на основі тестування програмно-апаратних засобів із використанням імітаційних і комбінованих моделей.

У роботі [11] розроблено методи і моделі контролю функціональних параметрів СКРП на базі графоаналітичного відтворення технологічних об'єктів із використанням параметрично-топологічних матриць. У праці [12] вдосконалено зазначені методи шляхом використання графо-функціональних моделей і функціонально-топологічних матриць, що дало змогу збільшити глибину контролю функціональних параметрів СКРП.

Проте в усіх зазначених розробках невирішеним залишається питання впливу ефективності контролю функціональних параметрів на показники експлуатаційної готовності для СКРП різного призначення – для об'єктів транспортної інфраструктури з різною масштабністю і складністю.

Визначення мети та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення показників експлуатаційної готовності та параметрів відновлення мікропроцесорних СКРП шляхом збільшення глибини контролю їхніх функціональних параметрів. Для досягнення зазначеної мети вирішуються такі завдання:

- розроблення моделі оцінювання глибини контролю функціональних параметрів СКРП, встановлення її обмежень та адекватності;

- розроблення методу синтезу моделей для випробувань СКРП і визначення його ефективності щодо забезпечення належної глибини контролю;

- визначення закономірностей, які встановлюють залежності між показниками готовності та відновлення СКРП при збільшенні глибини контролю та зміні параметрів технологічних об'єктів;

- формування рекомендацій щодо застосування розроблених методів, моделей і закономірностей.

Основна частина дослідження

Модель оцінювання глибини контролю СКРП.

Глибина контролю є основною характеристикою якості функціональних випробувань, що визначає обсяг випробувань відповідно до розмірності (масштабності) об'єкта контролю. Вона характеризується коефіцієнтом глибини контролю як відношення тестового покриття СКРП $N_{\phi mn}$ до її масштабності $N_{СКРП}$:

$$K_{ск} = \frac{N_{\phi mn}}{N_{СКРП}}. \quad (1)$$

Масштабність СКРП є сталою величиною ($N_{СКРП} = \text{const}$), отже оцінка коефіцієнта $K_{ск}$ визначається параметром тестового покриття $N_{\phi mn}$, що у свою чергу визначається обсягом охоплених випробуваннями множин об'єктів керування та контролю (ОКК) $M_{окк}$, програмно-апаратних засобів $M_{наз}$, функцій СКРП M_{ϕ} і технологічних ситуацій $M_{мс}$. Результуюча множина M_{mn}^m , потужність якої визначає тестове покриття, визначається як бінарне відношення на зазначених множинах [11]:

$$M_{mn}^m = M_{\phi} \times M_{окк} \times M_{мс} \times M_{наз}, \quad [M_{mn}^m] = N_{\phi mn}. \quad (2)$$

Відповідно до формули (2) множина M_{mn}^m формується як перетин модифікованих множин, що є складовими зазначеної формули (рис. 1).

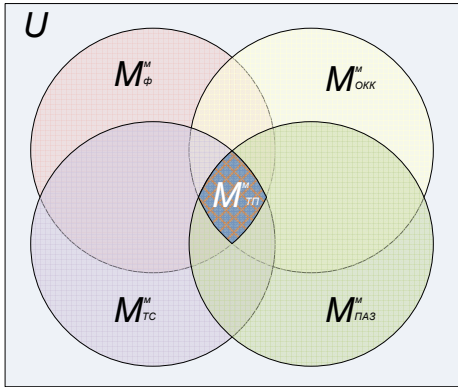


Рис. 1. Діаграма формування множини тестового покриття СКРП

Зазначена модифікація полягає у формуванні взаємних відношень між взаємопов'язаними складовими тестового покриття:

$$\begin{cases} M_{\phi}^m = M_{\phi} \times (M_{окк} \cup M_{тс} \cup M_{паз}), \\ M_{окк}^m = M_{окк} \times (M_{\phi} \cup M_{тс} \cup M_{паз}), \\ M_{тс}^m = M_{тс} \times (M_{\phi} \cup M_{окк} \cup M_{паз}), \\ M_{паз}^m = M_{паз} \times (M_{\phi} \cup M_{окк} \cup M_{тс}), \end{cases} \quad (3)$$

де $M_{ij} = M_i \cup M_j$ – об'єднання множин за відношеннями бієктивних зв'язків, між якими відбувається сумування ($i, j = \overline{1,4}$); $i, j = 1$ – функції (Ф), 2 – ОКК, 3 – технологічні ситуації (ТС), 4 – ПАЗ.

З урахуванням встановленої бієкції між складовими тестового покриття, що обумовлена результатами досліджень [11, 13], відношення $\prod_{ij} M_{ij}$ у контексті кількості логічних зв'язків між

елементами множин M_{mn} визначається чисельною характеристикою, яка прямо або опосередковано визначає кількість зазначених зв'язків. Зазначене співвідношення визначається характеристичними параметрами x_j , значення яких встановлюються системою лінійних рівнянь

$$\begin{cases} m_{\phi} = [M_{\phi}^m] = x_2 \sum_{M_{\phi_окк}} z_{12} + x_3 \sum_{M_{\phi_тс}} z_{13} + x_4 \sum_{M_{\phi_паз}} z_{14} = x_j \sum_{M_1} \sum_{M_j} z_{1j}, j = \overline{2,3,4}, \\ m_{окк} = [M_{окк}^m] = x_1 \sum_{M_{окк_ф}} z_{21} + x_3 \sum_{M_{окк_тс}} z_{23} + x_4 \sum_{M_{окк_паз}} z_{24} = x_j \sum_{M_2} \sum_{M_j} z_{2j}, j = \overline{1,3,4}, \\ m_{тс} = [M_{тс}^m] = x_1 \sum_{M_{тс_ф}} z_{31} + x_2 \sum_{M_{тс_окк}} z_{32} + x_4 \sum_{M_{тс_паз}} z_{34} = x_j \sum_{M_3} \sum_{M_j} z_{3j}, j = \overline{1,2,4}, \\ m_{паз} = [M_{паз}^m] = x_1 \sum_{M_{паз_ф}} z_{41} + x_2 \sum_{M_{паз_окк}} z_{42} + x_3 \sum_{M_{паз_тс}} z_{43} = x_j \sum_{M_4} \sum_{M_j} z_{4j}, j = \overline{1,2,3}, \end{cases} \quad (4)$$

де z_{ij} – бієктивні зв'язки між елементами множин M_i та M_j .

Розв'язання системи (4) за правилом Крамера з

урахуванням об'єднання зв'язків $Z_{12}Z_{34} = Y_1, Z_{13}Z_{24} = Y_2, Z_{14}Z_{23} = Y_3$ дає такий розв'язок:

$$\left\{ \begin{aligned} x_1 &= \frac{\Delta_{x_1}}{\Delta_{Z_{\phi_3}}} = \frac{2m_{\phi}Z_{23} + m_{окк}Z_{34}(Y_1 - Y_2 - Y_3) + m_{наз}Z_{23}(Y_3 - Y_1 - Y_2) + m_{мс}Z_{24}(Y_2 - Y_1 - Y_3)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)}, \\ x_2 &= \frac{m_{окк}Z_{13}Z_{14}Z_{34} + m_{\phi}Z_{34}(Y_1 + Y_2 + Y_3) + m_{наз}Z_{13}(Y_2 - Y_1 - Y_3) + m_{мс}Z_{14}(Y_3 - Y_1 - Y_2)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)}, \\ x_3 &= \frac{2m_{мс}Z_{12}Z_{14}Z_{24} + m_{наз}Z_{12}(Y_1 - Y_2 - Y_3) + m_{окк}Z_{14}(Y_3 - Y_1 - Y_2) + m_{\phi}Z_{24}(Y_2 - Y_1 - Y_3)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)}, \\ x_4 &= \frac{2m_{наз}Z_{12}Z_{13}Z_{23} + m_{мс}Z_{12}(Y_1 - Y_3 - Y_2) + m_{окк}Z_{13}(Y_2 - Y_3 - Y_1) + m_{\phi}Z_{23}(Y_3 - Y_1 - Y_2)}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

З метою спрощення виразів (5), що становлять розширену модель оцінювання тестового покриття СКРП, для забезпечення можливості її прикладного застосування вводяться такі обмеження:

- зв'язки $Z_{12,14}$, $Z_{23,24}$, $Z_{13,34}$ є взаємно незалежними, що обґрунтовується відокремленістю забезпечення

залежностей параметрів $m_{\phi}, m_{окк}, m_{мс}, m_{наз}$ за допомогою даних зв'язків;

- будь-яка різниця зведених параметрів Y_1, Y_2, Y_3 за абсолютною величиною не буде перевищувати детермінант системи (4)

$$\forall i, j, k \in \overline{1, 2, 3} \Rightarrow \left| Y_i - \sum_{j,k} Y_{j,k} \right| \leq \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right|, \quad (6)$$

що аргументується взаємною біективністю всіх попарних зв'язків $Z_{12,14}$, $Z_{23,24}$, $Z_{13,34}$, звідки випливає рівнозначність потужностей усіх множин $Y_{i,j,k}$;

- у доповнення до попереднього обмеження сума ліворуч від знака « \rightarrow » у детермінанті системи (5) не буде меншою за відповідну суму праворуч від цього знака, що додатково аргументується першим обмеженням у рамках встановлених умов

$$\sum_{i,j,k} Y_{j,k}^2 \geq \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k}. \quad (7)$$

Зазначені вище обмеження формалізуються розв'язанням системи квазілінійних нерівностей, що формується в результаті синтезу виразів (6) і (7) при

всіх комбінаціях значень індексів i, j, k для параметрів $Y_{i,j,k}$:

$$\left\{ \begin{aligned} |Y_1 - Y_2 - Y_3| &\leq \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right|, \\ |Y_2 - Y_1 - Y_3| &\leq \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right|, \\ |Y_3 - Y_1 - Y_2| &\leq \left| Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3) \right|, \\ Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 &\geq 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Усунення операції взяття абсолютної величини в системі (8) буде виправданим в умовах додаткового обмеження, що полягає в перевищенні суми будь-яких значень $Y_{j,k}$ над будь-яким значенням Y_i ($Y_j + Y_k > Y_i$), що обґрунтовується чисельністю і біективністю зв'язків:

$$\forall Y_{i,j,k} > 0 \quad Y_i < \sum_{j,k} Y_{j,k} \Rightarrow \left| Y_i - \sum_{j,k} Y_{j,k} \right| \Rightarrow \sum_{j,k} Y_{j,k} - Y_i = \sum_{-i,+j,+k} Y_{i,j,k}. \quad (9)$$

З урахуванням додатного значення кількості зв'язків $Y_{i,j,k}$ синтез виразів (8) і (9) призводить до модифікованої системи нерівностей

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{l} Y_{i,j,k} \\ Y_{i,j,k} \end{array} \right]^2 > \left[Y_{i,j,k} \right] \Rightarrow \left| \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k} \right| = \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k}, \\ & \left[Y_{i,j,k} \right] \in Z \\ & \sum_{j,k} Y_{j,k} - Y_i \leq \sum_{i,j,k} Y_{j,k}^2 - \sum_{i,j,k} \prod_{\substack{i,j \\ j,k \\ i,k}} Y_{j,k}, \end{aligned} \quad (10)$$

розв'язання якої на кількісному полі множин зв'язків СКРП визначається поверхнями, зображеними на рис. 2.

Рис. 2. Графічні області обмежень моделі тестового покриття функціональних випробувань СКРП

З урахуванням встановлених обмежень розв'язання системи (10) визначає таку модифіковану модель оцінювання тестового покриття:

$$\frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)} \rightarrow \max. \quad (11)$$

Область її адекватності визначається суперпозицією поверхонь, зображених на рис. 2, з поверхнями, що відображують систему (5), наведеними на рис. 3.

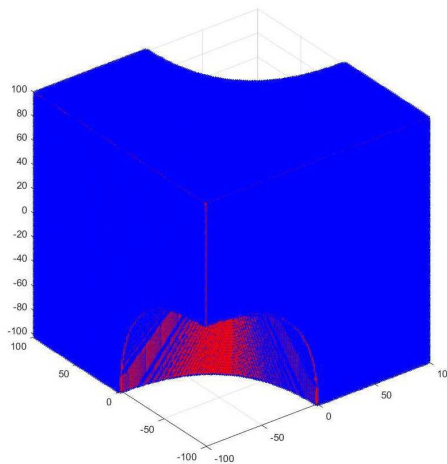
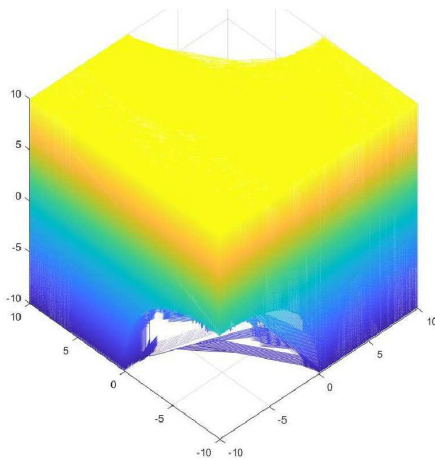
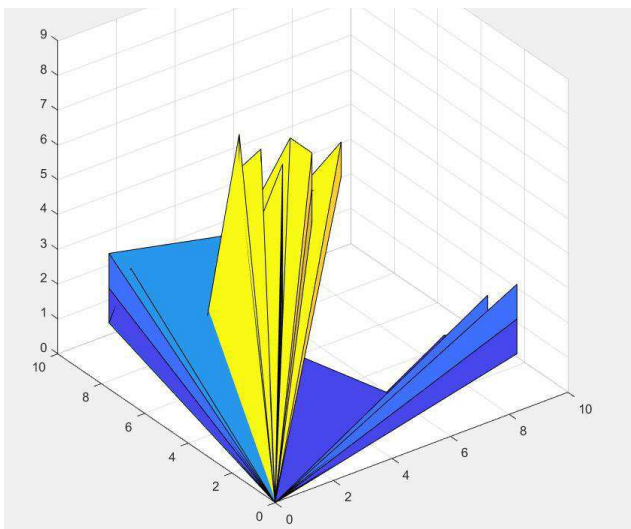


Рис. 3. Поверхні, які інтерпретують еталонні вирази для оцінювання адекватності моделі оцінювання тестового покриття

На підставі встановлених значень похибок моделі оцінювання тестового покриття визначаються можливі

діапазони використання моделей для випробувань СКРП з урахуванням потужності зв'язків між відповідними складовими.

Метод синтезу моделей для випробувань СКРП.

На підставі графо-функціональних методів відтворення технологічних об'єктів СКРП, запропонованих у роботі [12], модель для випробувань таких систем керування базується на аналітичному поданні ОКК, їхніх зв'язків і властивостей на базі функціонально-топологічних матриць суміжності (СФТМ), змістовне наповнення яких відбувається за діагональним принципом (рис. 4).

При такому підході в основу СФТМ покладаються її діагональні блоки ФТМ, що розмежуються матрицями

$$G_{\delta}^{l/l+1}(v_i, v_j, e_{ij}) \leftrightarrow |M_{\delta}^{l/l+1}| = \begin{vmatrix} f_i(\overline{u}_i) & 1 \\ 1 & f_{i+1}(\overline{u}_{i+1}) \end{vmatrix}, \quad (12)$$

які інтерпретують опорні елементарні дерева $G_{\delta}^{l/l+1}$ між суміжними компонентами l і $l+1$ графофункціональної моделі СКРП G_{YF} .

У таких умовах модель для випробувань СКРП, яка відтворює її технологічний об'єкт, визначається повною діагональною СФТМ у вигляді

$$|M_{СФТМ_G_{YF}}| = \begin{vmatrix} |M_{\phi_{тм_1}}| & |M_{нлк_21}| & |O_{31}| & \dots & |O_{(n-1)1}| & |O_{n1}| \\ |M_{впк_12}| & |M_{\phi_{тм_2}}| & |M_{нлк_32}| & \dots & |O_{(n-1)2}| & |O_{n2}| \\ |O_{13}| & |M_{впк_23}| & |M_{\phi_{тм_3}}| & \dots & |O_{(n-1)3}| & |O_{n3}| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ |O_{1(n-1)}| & |O_{2(n-1)}| & |O_{3(n-1)}| & \dots & |M_{\phi_{тм_n-1}}| & |M_{нлк_n(n-1)}| \\ |O_{1n}| & |O_{2n}| & |O_{3n}| & \dots & |M_{впк_n(n-1)}| & |M_{\phi_{тм_n}}| \end{vmatrix}, \quad (13)$$

де блоки ФТМ $|M_{\phi_{тм_l}}|$, сусідні з ними додаткові матриці $|M_{впк_l(l+1)}|$, $|M_{нлк_l(l+1)}|$ і нуль-матриці $|O_{(l\pm i)(lmj)}|$ визначаються за компонентами графа,

розмежованими опорними елементарними деревами (12).

За таких умов СФТМ (13) визначається поєднанням прямих сум

$$|M_{СФТМ_G_{YF}}| = \bigoplus_{i=1}^n |M_{\phi_{тм_i}}| + \left(\bigoplus_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n |M_{впк_ij}| \right) + \left(\bigoplus_{j=2}^{n-1} \sum_{k=3}^n |M_{нлк_jk}| \right) = \sum_l \left(\bigoplus_{i,j,k} |M_{впк_ij}| \right) \left(\bigoplus_{i,j,k} |M_{нлк_jk}| \right). \quad (14)$$

Зображений виразом (14) метод синтезу моделей для випробувань отримує назву методу модифікованих прямих сум (ММПС). На відміну від методу прямих сум (МПС), запропонованого в працях [11, 14], ММПС відтворює динамічні характеристики ОКК за рахунок

використання їхніх функціоналів $f_i(\overline{u}_i)$ і базується на використанні матриць суміжності, а не інцидентності.

	V_1	V_2	...	V_i	V_{i+1}	V_{i+2}	$V_{i+...}$	$V_{i+...}$
V_1	$f_1(u_1)$	Θ_{12}	...	Θ_1	c	c	c	c
V_2	Θ_{21}	$f_2(u_2)$	...	Θ_2	c	c	c	c
...	...	...	$f_{...}(u_{...})$	...	...	...	...	...
V_i	Θ_1	Θ_2	...	$f(u)$	1	c	c	c
V_{i+1}	c	c	c	1	$f_{+1}(u_{+1})$	$\Theta_{+1(+2)}$	$\Theta_{+1(+...)}$	$\Theta_{+1(+...)}$
V_{i+2}	c	c	c	c	$\Theta_{+2(+1)}$	$f_{+2}(u_{+2})$	$\Theta_{+2(+...)}$	$\Theta_{+2(+...)}$
$V_{i+...}$	c	c	c	c	$\Theta_{+...(+1)}$	$\Theta_{+...}$	$f_{+...}(u_{+...})$	$\Theta_{+...(+...)}$
$V_{i+...}$	c	c	c	c	$\Theta_{+...(+1)}$	$\Theta_{+...(+2)}$	$\Theta_{+...(+...)}$	$f_{+...}(u_{+...})$

Рис. 4. Структура змістовного наповнення СФТМ

(15)

Оцінка ефективності ММПС порівняно зі своїм найближчим аналогом МПС за критерієм збільшення глибини контролю (тестового покриття) випробувань базується на встановленому зв'язку потужності множин тестового покриття з моделлю його оцінювання, який відповідно до виразів (2) – (4), (11) визначається як

де B, C, D і L – відповідно впорядковані множини (вектори) вагових параметрів ОКК, що інтерпретуються графічною моделлю СКРП і відповідають зазначеним множинам тестового покриття.

Ефективність методу оцінюється за критеріями

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} [B = \{b_i\}] \nearrow \\ [C = \{c_j\}] \nearrow \\ [D = \{d_k\}] \nearrow \\ [L = \{l_l\}] \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} [M_{\phi}^M] \nearrow \\ [M_{окк}^M] \nearrow \\ [M_{мс}^M] \nearrow \\ [M_{нас}^M] \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3) \nearrow \\ (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2) \swarrow \end{array} \right\} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \left(\frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)} \right) \nearrow \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \frac{1}{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3)} \rightarrow \max, \end{aligned}$$

$$\beta_{\phi mn} = \frac{N_{\phi mn_ммпс}}{N_{\phi mn_мс}} \rightarrow \max, \cdot \delta_{\phi mn} = \frac{N_{\phi mn_мс} - N_{\phi mn_ммпс}}{N_{\phi mn_ммпс}} = \beta_{\phi mn} - 1 \rightarrow \min, \quad (16)$$

які визначають відповідні співвідношення між параметрами $N_{\text{фгп}}$ для ММПС та МПС.

Шляхом поєднання виразів (15) і (16) визначається

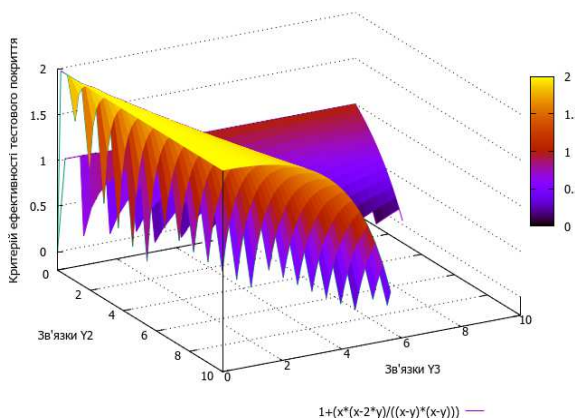
$$\beta_{\text{фгп}} \sim \frac{(Y_2 - Y_3)^{-2}}{[Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3 + Y_2Y_3)]^{-1}} = \frac{(Y_2 - Y_3)^2 + Y_1^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2} =$$

$$= 1 + \frac{Y_1^2 - 2(Y_1Y_2 + Y_1Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{Y_1^2 - 2Y_1Y_2 - 2Y_1Y_3 + Y_2^2 - Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{(Y_1 - Y_2)^2 - 2Y_1Y_3 + Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2}.$$

Виходячи зі встановленої у роботі [11] взаємно-однозначної відповідності між ОКК та його функціями ($a_i \leftrightarrow f_i(u_i)$), а також характер зв'язків між компонентами тестового покриття, значення Y_1 можна вважати приблизно рівним значенню Y_2 у межах кожного технологічного об'єкта СКРП ($Y_1 \approx Y_2$). Таким чином, відповідний критерій ефективності визначається як

$$\beta_{\text{фгп}} \sim 1 + \frac{(Y_2 - Y_2)^2 - 2Y_2Y_3 + Y_2^2}{(Y_2 - Y_3)^2} = 1 + \frac{Y_2(Y_2 - 2Y_3)}{(Y_2 - Y_3)^2}. \quad (17)$$

Відповідно до виразу (17) на рис. 5 побудовано графічні 3D-залежності, які визначають характер мінливості параметра $\beta_{\text{фгп}}$ при зміні Y_2 , Y_3 , які визначають відповідно складність і масштабність СКРП.



вираз для критерію ефективності з урахуванням моделі оцінювання тестового покриття

Рис. 5. 3D-графік орієнтованої (пропорційної) оцінки критерію ефективності тестового покриття $\beta_{\text{фгп}}$

З наведеного графіка вбачається, що до точки нескінченного розриву $Y_2 \approx Y_3$ при збільшенні кожного з цих параметрів відбувається зменшення значень $\beta_{\text{фгп}}$, що цілком відповідає критерію ефективності ММПС, встановленого виразом (16). Фактично це означає, що розроблений метод буде мати різну ефективність порівняно з найближчим аналогом при різних значеннях складності і масштабності СКРП з різними тенденціями монотонності при відповідних співвідношеннях.

Оцінювання експлуатаційної готовності СКРП.

Основним параметром експлуатаційної готовності СКРП є коефіцієнт готовності, який у ймовірнісному відношенні визначається як

$$K_z = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_B}, \quad (18)$$

де T_{cp} і T_B – відповідно середнє напрацювання до відмови та середній час відновлення СКРП.

Додатково експлуатаційну готовність характеризує інтенсивність відновлення $\mu = 1/T_B$ як величина, обернена середньому часу відновлення.

Результуюча середня тривалість відновлення T_B СКРП з урахуванням формул (1), (4) і праць [3, 4] визначатиметься як добуток сумарної тривалості верифікації та відновлення $T_{\text{вв}}$, кількості ОКК $m_{\text{окк}}$ та коефіцієнта глибини контролю $K_{\text{зк}}$, що визначається як відношення обсягу тестового покриття до загальної масштабності технологічного об'єкта:

$$T_B = (m_{\text{окк}} + m_{\text{наз}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{мс}}) T_{\text{вв}} K_{\text{зк}} = \frac{N_{\text{фгп}}}{N_{\text{СКРП}}} \sum_{i=1}^{m_{\text{окк}} + m_{\text{наз}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{мс}}} t_{\text{вв}_i}, \quad (19)$$

$t_{\text{вв}_i}$ – тривалість верифікації та відновлення одного функціонального модуля СКРП з умовним номером i .

З результатів досліджень ефективності ММПС за критерієм збільшення тестового покриття випробувань

впливає, що наведені значення Y_2 та Y_3 визначають відповідно обсяги внутрішніх і зовнішніх зв'язків ОКК (складність і масштабність технологічного об'єкта СКРП), звідки загальна масштабність СКРП дорівнюватиме їх добутку: $N_{СКРП} = Y_2 \times Y_3$.

З урахуванням ізоморфізму між компонентами тестового покриття, встановленого в праці [11], і прийнятих вище обмежень щодо моделі оцінювання тестового покриття впливає рівнозначність масштабності СКРП та загальної кількості її ОКК, ПАЗ, функцій і технологічних ситуацій $m_{окк} + m_{паз} + m_{ф}$

+ $m_{мс} = N_{СКРП}$, звідки відбувається скорочення виразів у формулі (19):

$$T_B = Y_2 Y_3 T_{\text{вс}} \frac{N_{\text{фmn}}}{Y_2 Y_3} = T_{\text{вс}} N_{\text{фmn}}. \quad (20)$$

Шляхом поєднання формул (17) – (20) формуються такі вирази для оцінки середнього часу та інтенсивності відновлення СКРП при здійсненні контролю їхніх функціональних параметрів із використанням ММПС і МПС:

$$T_B^{\text{ММПС}} = T_{\text{вс}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right), \mu_B^{\text{ММПС}} = \frac{1}{T_{\text{вс}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right)}, \quad (21)$$

$$T_B^{\text{МПС}} = T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2, \mu_B^{\text{МПС}} = \frac{1}{T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2},$$

а відповідні коефіцієнти готовності матимуть такі значення:

$$K_2^{\text{ММПС}} = \frac{T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} + T_{\text{вс}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right)},$$

$$K_2^{\text{МПС}} = \frac{T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} + T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2}. \quad (22)$$

Відповідно до формули (21) вираз в інтенсивності відновлення СКРП при застосуванні розробленого методу визначається виразом

$$\delta\mu_{СКРП} = \frac{\mu_{СКРП}^{\text{ММПС}}}{\mu_{СКРП}^{\text{МПС}}} = \frac{T_{\text{вс}} (Y_2 - Y_3)^2}{T_{\text{вс}} \left((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3) \right)} = \frac{(Y_2 - Y_3)^2}{(Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3)}, \quad (23)$$

що демонструється поверхнями на рис. 6.

відновлення СКРП

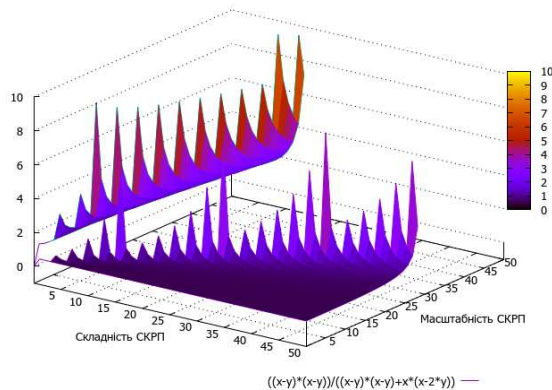


Рис. 6. Поверхневий графік виразу в інтенсивності

З наведених поверхонь впливає, що за виключенням точок нескінченного розриву найбільше збільшення інтенсивності відновлення відбувається при максимальній відповідності складності та масштабності СКРП, при цьому спостерігається позитивна монотонність для цього параметра всіх значень кількості внутрішніх і зовнішніх зв'язків. Точки нескінченного розриву визначають значення, при яких втрачає сенс використання розроблених методів і моделей випробувань, пояснення характеру їхніх закономірностей вимагає окремого дослідження

Відповідно до формули (21) і (22) підвищення експлуатаційної готовності СКРП з точки зору збільшення коефіцієнта δK_2 готовності визначається як

$$\delta K_z = \frac{T_{cp} (T_{cp} + T_{ee} (Y_2 - Y_3)^2)}{T_{cp} (T_{cp} + T_{ee} ((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3)))} = \frac{T_{cp} + T_{ee} (Y_2 - Y_3)^2}{T_{cp} + T_{ee} ((Y_2 - Y_3)^2 + Y_2 (Y_2 - 2Y_3))} \quad (24)$$

Як випливає з отриманого виразу, інтенсивність збільшення коефіцієнта готовності СКРП залежить від середнього напруження до відмови та середньої тривалості відновлення і верифікації одного функціонального модуля. При вихідних значеннях цих параметрів на рівні одного року та 12 хвилин закономірність, визначена формулою (24), інтерпретована у відсотки, демонструється 3D-поверхнею, зображеною на рис. 7.

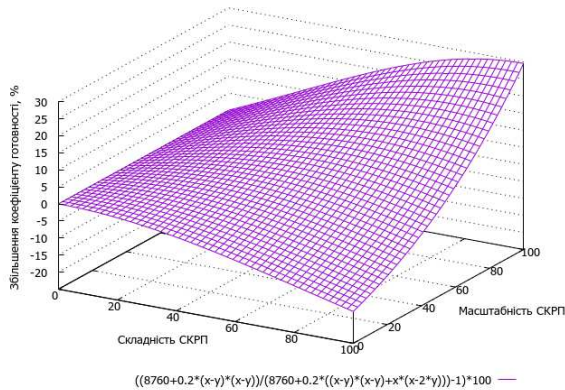


Рис. 7. Поверхневий графік виграшу в коефіцієнті готовності СКРП

З отриманої поверхні випливає певний діапазон співвідношень між обсягом внутрішніх і зовнішніх зв'язків ОКК СКРП, при яких розроблені методи та моделі функціональних випробувань мають ефективність щодо підвищення коефіцієнта готовності. Шляхом встановлення обмежень, при яких спостерігається збільшення, а не зменшення коефіцієнта готовності, зазначена область (діапазон) визначається поверхневим графіком на рис. 8.

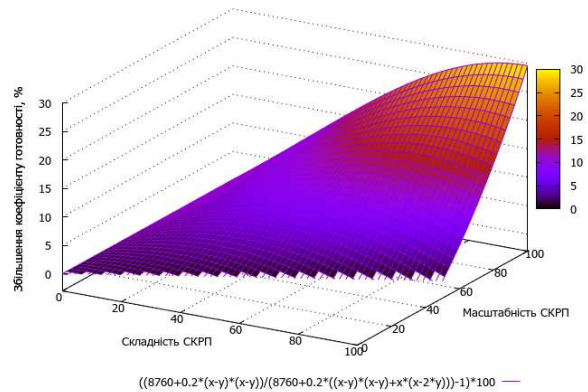


Рис. 8. Область збільшення коефіцієнта готовності СКРП

Як випливає з отриманої поверхні, підвищення коефіцієнта готовності СКРП відбувається тільки за умови, коли складність технологічних об'єктів СКРП не перевищує їхньої масштабності. Зазначена умова є умовою припустимості використання розроблених методів і моделей контролю функціональних параметрів, при яких досягається підвищення експлуатаційної готовності СКРП.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку

Розроблені методи та моделі контролю функціональних параметрів СКРП дозволяють підвищити експлуатаційну готовність і параметри відновлення СКРП – до 30 % коефіцієнт готовності та до шести разів інтенсивність відновлення, що свідчить про їхню ефективність. Подальший розвиток досліджень у даному напрямі полягає в деталізації закономірностей, які визначають експлуатаційну готовність СКРП з огляду на складність і масштабність СКРП та об'єктів транспортної інфраструктури, на яких вони впроваджуються.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р / Кабінет міністрів України. Офіційний вісник України. 2018. № 52. С. 533. Ст. 1848. Код акта 90720/2018.
2. Бочков К. А., Харлап С. Н. Методы обеспечения безопасности в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики: учеб. пособие для студ. трансп. спец. высш. учеб. заведений. Гомель: БелГУТ, 2001. 84 с.
3. Каракаев А. Б., Луканин А. В. Исследование основных зависимостей между показателями между показателями надежности и показателями глубины контроля судового электрооборудования. *Вестник Государственного университета*

- морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2016. Вып. 3 (37). С. 180-192.
4. Иванов Д. Е., Громова Т. В., Швецова-Шиловская Т. Н. Автоматизированный анализ контролепригодности систем контроля технологического оборудования на опасных производственных объектах. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. Москва, 2016. № 3. С. 114-128. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-114-128.
 5. Markevicius V., Navikas D., Idzkowski A., Andriukaitis D., Valinevicius A., Zilys M. [Practical Methods for Vehicle Speed Estimation Using a Microprocessor-Embedded System with AMR Sensors](#). *Sensors (Basel)*. 2018. Vol. 18(7): 2225. P. 1-12. DOI: 10.3390/s18072225.
 6. ŞENER I., KAYMAKÇI O. T., USTOĞLU İ., CANSEVER G. [Specification and formal verification of safety properties in a point automation System](#). *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2016. Vol. 24. P. 1384-1396. DOI:10.3906/elk-1311-27.
 7. Fantechi A., Lecomte T., Romanovsky A. [Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification](#): second International conference, RSSRail, 2017 Pistoia, Italy, November 14-16, 2017 Proceedings. 2017. Pistoia, Italy. P. 217. DOI: 10.1007/978-3-319-68499-4.
 8. Kans M., Galar D., Thaduri A. [Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry](#). A data fusion approach of multiple maintenance data sources for real-world reliability modeling. 2016. P. 317-331. DOI: 10.1007/978-3-319-27064-7_30.
 9. Hwang J.-G., Baek J.-H., Jo H.-J., Lee K.-M. [Black-box testing tool of railway signalling system software with a focus on user convenience](#). *WIT Transactions on The Built Environment*. Korea. 2014. Vol 135. P. 99-108. DOI:10.2495/CR140081.
 10. Chen X., Wang D., Huang H., Wang Z. [Verification and validation in railway signalling engineering – an application of enterprise systems techniques](#). *Enterprise Information Systems*. 2014. Vol. 8:4. P. 490-511. DOI: [10.1080/17517575.2013.835071](#).
 11. Listrovoy S., Panchenko S., Listrova E. *Mathematical models in computer control systems railways and parallel computing: monograph*. Kharkiv, 2017. 300 p.
 12. Boinik A., Prohonnii O., Kameniev O., Kuzmenko D., Shchablykina O. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distributed systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 94. № 4/4. P. 59-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140636 (видання індексується в базі Scopus).
 13. Кустов В. Ф., Каменев А. Ю. Экспериментально-статистические модели распределённых технологических объектов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 2. С. 97-101.
 14. Каменев О. Ю. Удосконалення методів контролю параметрів системи мікропроцесорної централізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал*. Харків: УкрДУЗТ, 2013. Вип. 3. С. 75-77.
- Щеблыкина Е. В., Каменев А. Ю., Лапко А. А., Сагайдачный В. Г. Повышение показателей готовности и восстановления систем управления движением поездов на основании увеличения глубины контроля.**
Аннотация. Бесперебойность процессов перевозок железнодорожным транспортом определяется эксплуатационной надежностью систем управления движением поездов. Одними из важнейших их параметров, определяющих работоспособность и исправность систем управления, является эксплуатационная пригодность к регулированию движения поездов и производству маневровой работы, а также способность к восстановлению после отказов. Они определяются коэффициентами готовности и интенсивностью восстановления соответственно. С целью повышения данных показателей в опубликованном исследовании, опираясь на последние научные достижения, разработана модель оценки глубины контроля функциональных параметров систем управления движением поездов, который осуществляется путем функциональных испытаний. На основании научных данных, которые определяют взаимосвязь между коэффициентом готовности, интенсивностью восстановления технических средств и глубиной их контроля, установлены закономерности, определяющие увеличение эксплуатационной готовности и показателей восстановления систем управления движением поездов при изменении масштаба и сложности технологических объектов. Разработан метод, который позволяет на основе увеличения глубины контроля добиться повышения эксплуатационной готовности и параметра восстановления систем управления движением поездов соответственно до 30 % и до шести раз. С учетом корреляции между отказами устройств управления движением поездов и их задержками указанные результаты позволяют уменьшить непродуктивный простой поездов до 15 %.
- Ключевые слова:** системы управления движением поездов, надежность, готовность, восстановление, глубина контроля, тестовое покрытие, функциональные испытания.
- Shchablykina O., Kameniev O., Lapko A., Sagajdachnyj V. Improving readiness and recovery indicators of train traffic control systems based on increasing the depth of control.**