

Є. В. Ручков<sup>1,2</sup>, В. С. Харченко<sup>2</sup>, А. А. Коваленко<sup>3</sup>, Є. В. Бабешко<sup>2</sup>, А. І. Порошенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ПАТ «Науково-виробниче підприємство «Радій», Кропивницький, Україна

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОЦІНЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СТРУКТУР «2-3-3» І «1-3-2» З УРАХУВАННЯМ ЗАСОБІВ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОМУНІКАЦІЙ

**Анотація.** Предметом досліджень статті є резервовані структури складних систем (РСС), зокрема, керуючих систем безпеки АЕС, енергомереж, аерокосмічних систем, інших комплексів критичного застосування (ККЗ). Метою є розроблення і дослідження моделей надійності (безвідмовності) таких РСС з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій ККЗ. **Завдання:** 1) сформулювати множину РСС, які базуються на мажоритарному резервуванні за принципом «2-3-3» і дубльованні за принципом «1-3-2» засобів оброблення інформації та комунікацій при послідовно-паралельних і місткових з'єднаннях елементів; 2) розробити структурні схеми надійності (ССН), математичні (аналітичні) моделі безвідмовності РСС з каскадним резервуванням «2-3-3» і «1-3-2»; 3) дослідити ці моделі і визначити залежності ймовірностей безвідмовної роботи різних РСС від часу, інтенсивностей відмов засобів оброблення інформації та комунікацій, мажоритарних елементів, елементів «1-3-2»; 4) сформулювати рекомендації щодо вибору типів РСС залежно від значень вхідних параметрів та вимог до систем. Для цього використовувались методи теорії множин, теорії ймовірностей, комбінаторного аналізу. Отримано такі результати. Запропоновано множину РСС з різними варіантами резервування і з'єднання ярусів «2-3-3», розроблено і досліджено відповідні ССН і математичні моделі безвідмовності та сформульовано рекомендації щодо їх використання залежно від вхідних параметрів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих моделей полягає в наступному: вони надають аналітичну оцінку для РСС з різними варіантами каскадів «2-3-3» і «1-3-2» з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій ККЗ.

**Ключові слова:** резервування; оцінювання; структура; безвідмовність; оброблення інформації; логіка; комунікації.

### Вступ

Резервування застосовується сучасною промисловою у багатьох сферах, включаючи генерацію електроенергії, машинобудування, аерокосмічну та хімічну галузі, переробку тощо. Оцінювання безвідмовності резервованих структур є комплексною задачею, вирішення якої неможливо без попередньої формалізації і представлення первинною моделлю. Найбільш поширеним типом моделей для оцінювання безвідмовності є структурні схеми надійності (ССН) (Reliability Block Model)

До теперішнього часу багатьма авторами описано можливі підходи і рішення стосовно мажоритарно-резервованих систем, дубльованих систем і різних типів логіки резервування, починаючи від класичних монографій [1] до сучасних праць [2, 3].

Більшість авторів не враховує безвідмовність засобів комунікацій, що може призвести до завищених оцінок показників надійності. Традиційно ці засоби припускаються абсолютно надійними, але для багатьох промислових систем таке припущення є достатньо оптимістичним з огляду на складність кабельних засобів комунікацій [4, 5], а також велику кількість додаткових з'єднань між конструктивами (шафами, окремими модулями, ...), які розміщені у приміщеннях підприємства.

У роботах [6-8] досліджувався вплив безвідмовності засобів комунікацій на безвідмовність мажоритарно-резервованих систем, які працюють за логікою «2-3-3» та «2-3-4».

Однак в цих роботах різні варіанти резервування структур, які працюють за логікою «1-3-2» та «2-3-3», по-перше, не були систематизовані, а, по-друге, не були досліджені з урахуванням різних варіантів

включення елементів голосування. В умовах практичного застосування резервовані структури іноді мають надлишковість і з точки зору засобів комунікацій, які можуть резервуватися у різний спосіб [9].

**Метою статті** є систематизація резервованих структур складних систем (РСС), і розроблення і дослідження РСС з логікою «2-3-3» та «1-3-2» з урахуванням засобів комунікацій.

Відповідно до мети стаття структурується наступним чином:

1) формується множина РСС, які базуються на мажоритарному резервуванні за принципом «2-3-3» і дубльованні за принципом «1-3-2» засобів оброблення інформації та комунікацій при послідовно-паралельних і місткових з'єднаннях елементів;

2) розробляються структурні схеми надійності (ССН), математичні (аналітичні) моделі безвідмовності РСС з каскадним резервуванням «2-3-3» і «1-3-2»;

3) досліджуються залежності ймовірностей безвідмовної роботи різних РСС від часу, інтенсивностей відмов засобів оброблення інформації та комунікацій, мажоритарних елементів, елементів «1-3-2»;

4) формулюються загальні рекомендації щодо вибору типів РСС залежно від значень вхідних параметрів та вимог до систем.

### Систематизація та розроблення резервованих структур

В рамках сформульованих задач на першому етапі є огляд резервованих структур та їх систематизація. Розглянемо наступні варіанти, що наведено нижче.

На рис. 1 наведено найпростішу нерезервовану структуру ( $S_0$ ), що враховує як процеси обробки даних ( $D$ ), так і комунікації ( $C$ ).

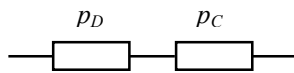


Рис. 1. Послідовна нерезервована структура

На рис. 2 наведено просту резервовану структуру ( $S_1$ ), яка працює за логікою «2-3-3».

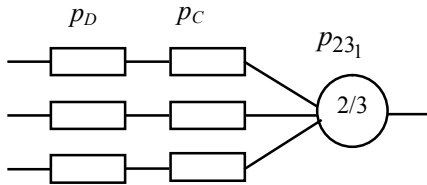


Рис. 2. Мажоритарно-резервована структура з загальним вузловим резервуванням за логікою «2-3-3»

Структуру, що реалізує мажоритарно-резервовану структуру з дубльованою логікою «2-3-3» ( $S_2$ ), наведено на рис. 3.

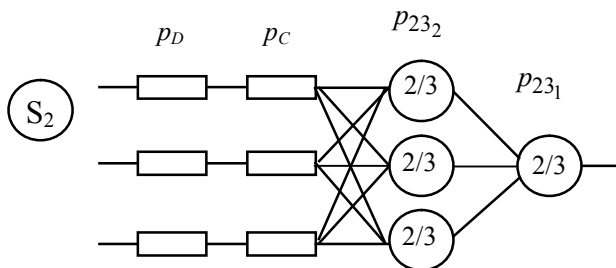


Рис. 3. Мажоритарно-резервована структура з загальним резервуванням і каскадною логікою «2-3-3» (мережним і вузловим)

На рис. 4 представлено структуру ( $S_3$ ), яка являє собою окремий випадок попередньої структури та реалізує на виході логіку «1-3-2».

Рис. 6 відбиває структуру ( $S_5$ ) з секційним розділенням та голосуванням за логікою «2-3-3».

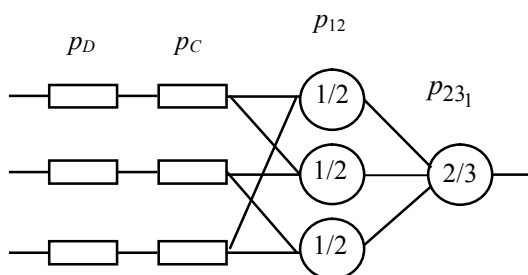


Рис. 4. Резервована структура з загальним резервуванням з каскадною логікою «1-3-2» і «2-3-3» (мережним і вузловим) мажоритарним резервуванням

На рис. 5 представлено структуру ( $S_4$ ) з розділним резервуванням за логікою «2-3-3».

Окремий випадок структури  $S_5$  приведено на рис. 7. У такій структурі ( $S_6$ ) також є окремі секції, але вони здійснюють роздільне голосування за логікою «1-3-2» та «2-3-3».

Наступна структура  $S_7$  (рис. 8) являє собою нелінійний варіант, де зв'язки включено до мажоритарної структури.

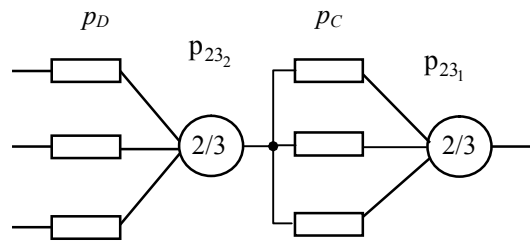


Рис. 5. Мажоритарно-резервована структура з розділним вузловим резервуванням за логікою «2-3-3»

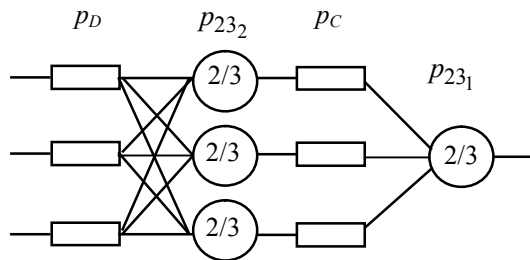


Рис. 6. Мажоритарно-резервована структура з розділним мережним резервуванням за логікою «2-3-3»

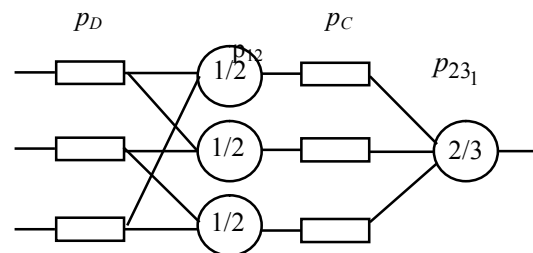


Рис. 7. Структура з розділним голосуванням за логікою «1-3-2» та «2-3-3»

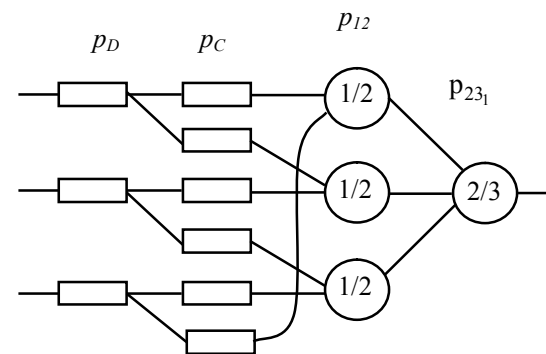


Рис. 8. Місткова структура з каскадним резервуванням «1-3-2», «2-3-3»

Останнім варіантом у рамках даного дослідження є структура  $S_8$  (рис. 9), де реалізовано варіант подвійного (каскадного) голосування за логікою «2-3-3».

### Моделі безвідмовності

У даному підрозділі наведено результати розробки аналітичних залежностей (1) – (8), що відповідають кожній з наведених у попередньому підрозділі структур ( $S_0$ –  $S_8$ ).

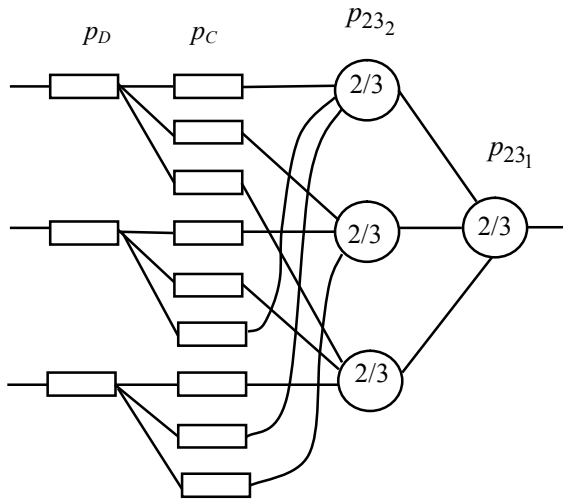


Рис. 9. Місткова структура з каскадним мережним і вузловим резервуванням «2-3-3»

$$P_{S_0} = p_D \cdot p_C \quad (1)$$

$$P_{S_1} = (3p_D^2 p_C^2 - 2p_D^3 p_C^3) p_{231} \quad (2)$$

$$P_{S_2} = (3p_D^2 p_C^2 - 2p_D^3 p_C^3) \cdot (3p_{232}^2 - 2p_{232}^3) p_{231}; \quad (3)$$

$$P_{S_3} = \left\{ \begin{aligned} & [1 - (1 - p_D p_C)^3] p_{12}^3 + 3p_{12}^2 \times \\ & \times (1 - p_{12}) (p_D p_C + p_D^2 p_C^2 - p_D^3 p_C^3) \end{aligned} \right\} p_{231}; \quad (4)$$

$$P_{S_4} = (3p_D^2 - 2p_D^3) p_{232} \cdot (3p_C^2 - 2p_C^3) p_{231} \quad (5)$$

$$P_{S_5} = (3p_D^2 - 2p_D^3) \cdot (3p_C^2 p_{232}^2 - 2p_C^3 p_{232}^3) p_{231} \quad (6)$$

$$P_{S_6} = \left\{ \begin{aligned} & [1 - (1 - p_D)^3] p_{12}^3 p_C^3 + 3p_{12}^2 p_C^2 \times \\ & \times (p_D + p_D^2 - p_D^3) \cdot (1 - p_{12} p_C) \end{aligned} \right\} p_{231} \quad (7)$$

$$P_{S_7} = p_{231} \times$$

$$\left[ \begin{aligned} & \left\{ p_D^3 \sum_{i=0}^4 C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + 3p_D^2 (1-p_D) \left[ \sum_{i=0}^2 C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + \sum_{i=3}^4 C_4^{6-i} (1-p_C)^i \right] + 3p_D^2 (1-p_D)^2 p_C^2 \right\} \times \\ & \times p_{12}^3 + 3p_{12}^2 (1-p_{12}) \times \left\{ p_D^3 \left[ \sum_{i=3}^2 C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + \sum_{i=3}^4 C_4^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i \right] + 3p_D (1-p_D)^2 p_C^2 \right\} \end{aligned} \right]; \quad (8)$$

$$P_{S_8} = p_{231} \cdot \left[ \begin{aligned} & p_{232}^3 \left\{ p_D^3 \left[ \sum_{i=0}^3 C_9^{9-i} p_C^{9-i} (1-p_C)^i + 3C_3^2 C_3^2 C_3^1 p_C^5 (1-p_C)^4 + 3C_3^2 C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^5 \right] + \right. \\ & \left. + 3p_D^2 (1-p_D) \cdot \left[ \sum_{i=0}^1 C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + C_3^2 C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^2 \right] + \right. \\ & \left. + 3p_{232}^2 (1-p_{232}) \cdot \left\{ p_D^3 [p_C^2 + C_6^1 p_C^5 (1-p_C) + C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^2] + 3p_D^2 (1-p_D) p_C^4 \right\} \right] \end{aligned} \right] \quad (9)$$

### Дослідження

На першому етапі досліджень проводилося моделювання безвідмовності структур  $S_0-S_8$ , зокрема, досліджено залежності ймовірностей  $P_{S1} - P_{S8}$  як функцій ймовірностей  $p_D, p_C, p_{12}, p_{231}, p_{232}$ .

Відповідні вихідні дані та результати представлено у вигляді табл. 1. У табл. 2 наведено результати залежності ймовірності безвідмовності кожної зі структур  $S_0-S_8$ , що наведені на рис. 1-9, відповідно. Можна відмітити, що, в цілому, спостерігається збільшення такої ймовірності зі збільшенням відповідної ймовірності окремих компонент структури, та, водночас, з ускладненням (тобто переходом від початкового типу мажоритарно-резервованої структури з загальним вузловим резервуванням за логікою «2-3-3» до останнього типу – місткової структури з каскадним мережним і вузловим резервуванням «2-3-3») відповідних схем резервування у таких структурах. Такі результати моделювання цілком відповідають теоретичним очікуванням.

На другому етапі досліджень було виконано моделювання моделей безвідмовності структур  $S_0-S_8$ , у якості яких було обрано ймовірності  $P_{S1} - P_{S8}$

як функції часу, а також відповідні інтенсивності відмов  $\lambda_D, \lambda_C, \lambda_{12}, \lambda_{231}, \lambda_{232}$  (1/год), де  $p_z = \exp(-\lambda_z t)$ . Вихідні дані представлено у вигляді табл. 3.

Таблиця 1 – Вихідні дані

$p_D$	$p_C$	$p_{12}$	$p_{231}$	$p_{232}$
0.9	0.95	0.995	0.990	0.990
0.9	0.95	0.999	0.999	0.999
0.9	0.99	0.995	0.990	0.990
0.9	0.99	0.999	0.999	0.999
0.95	0.99	0.995	0.993	0.993
0.95	0.99	0.999	0.995	0.995
0.95	0.995	0.999	0.997	0.997
0.95	0.995	0.9995	0.999	0.999
0.99	0.995	0.9995	0.9993	0.9993
0.99	0.995	0.9999	0.9995	0.9995
0.99	0.999	0.9999	0.9997	0.9997
0.99	0.999	0.9995	0.9999	0.9999
0.995	0.999	0.9999	0.9995	0.9995
0.995	0.999	0.99995	0.9999	0.9999
0.995	0.9995	0.99995	0.9999	0.9999
0.995	0.9995	0.99999	0.99995	0.99995

Таблwз 2 – Результати моделювання

$Ps_0$	$Ps_1$	$Ps_2$	$Ps_3$	$Ps_4$	$Ps_5$	$Ps_6$	$Ps_7$	$Ps_8$
0,855000	0,933592	0,933314	0,98638	0,94575	0,952465	0,977826	0,985645	0,955787
0,855000	0,942079	0,942076	0,995844	0,963024	0,963723	0,988017	0,9949	0,96715
0,891000	0,957278	0,956992	0,988333	0,952373	0,961152	0,987578	0,98814	0,960719
0,891000	0,96598	0,965977	0,99764	0,969768	0,970679	0,997062	0,997404	0,970841
0,940500	0,982872	0,982728	0,992618	0,978608	0,984963	0,992012	0,992589	0,985024
0,940500	0,984852	0,984778	0,994768	0,982554	0,987131	0,994365	0,994715	0,987322
0,945250	0,988362	0,988335	0,996816	0,986729	0,989583	0,996684	0,996787	0,98962
0,945250	0,990344	0,990341	0,998827	0,990691	0,991651	0,998707	0,998796	0,991716
0,985050	0,998637	0,998635	0,999295	0,998228	0,998905	0,999206	0,999295	0,99899
0,985050	0,998837	0,998836	0,999496	0,998628	0,999112	0,999418	0,999496	0,999193
0,989010	0,99934	0,99934	0,999699	0,999099	0,999397	0,999695	0,999698	0,999401
0,989010	0,99954	0,99954	0,999898	0,999499	0,999598	0,999891	0,999897	0,999602
0,994005	0,999393	0,999392	0,9995	0,998923	0,999419	0,999496	0,9995	0,999422
0,994005	0,999793	0,999793	0,9999	0,999722	0,999822	0,999896	0,9999	0,999825
0,994503	0,99981	0,99981	0,9999	0,999725	0,999824	0,999899	0,9999	0,999825
0,994503	0,99986	0,99986	0,99995	0,999825	0,999874	0,999949	0,99995	0,999875

Таблwз 3 – Вихідні дані для другого етапу моделювання

$\lambda_D$	$\lambda_C$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{231}=\lambda_{232}$	$t$
0.001	0.0005	0.00005	0.0001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.0005	0.00001	0.00005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.0005	0.000001	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.000001	0.000002	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.0000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.0000001	0.0000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.000002	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.000001	0.000002	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000005	0.0000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000005	0.00000001	0.0000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.0000002	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.0000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.00000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000

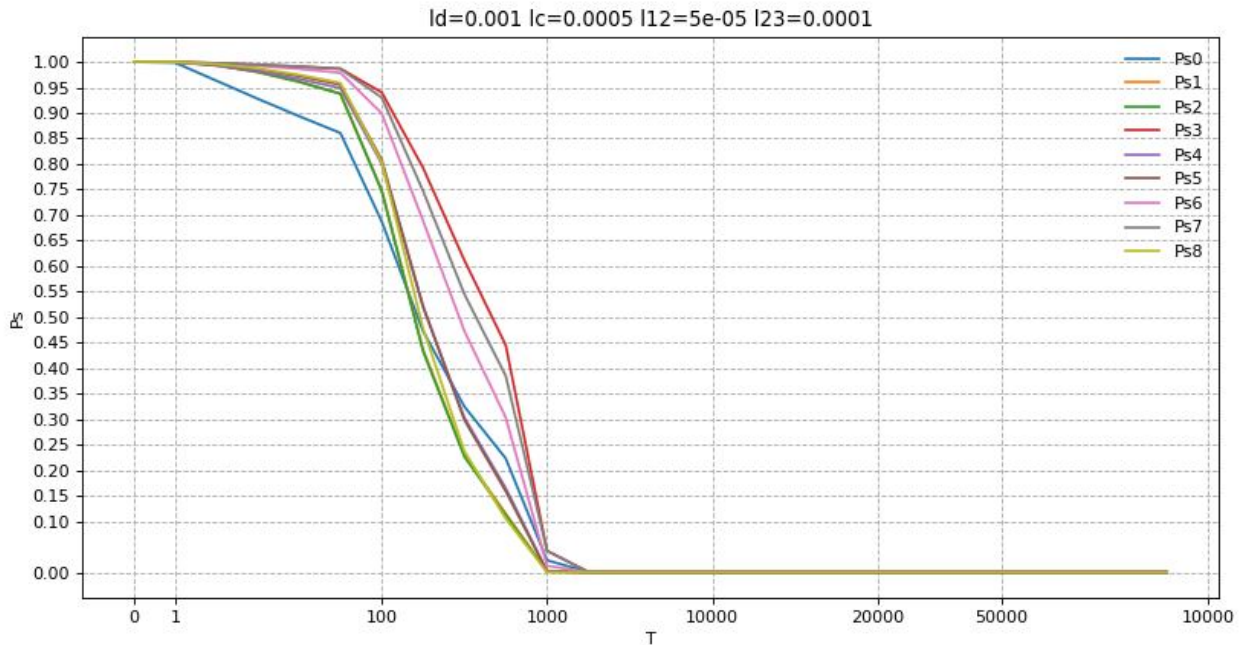
Відповідні результати для першого та останнього наборів вихідних даних відповідно наведено на рис. 10 - 12.

Слід окремо зазначити, що результати для усіх інших наборів вхідних даних не приведено у рамках даної статті внаслідок їх прогнозованої зміни між наведеними значеннями.

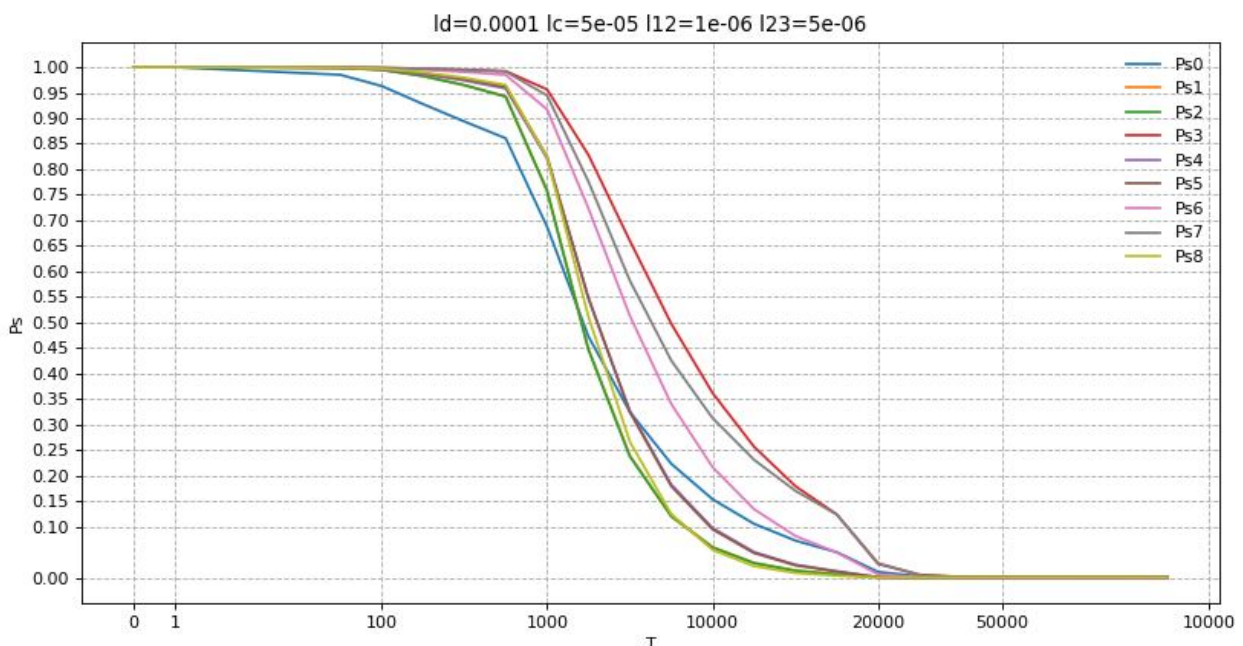
Так, можна констатувати, що наведені часові залежності є цілком прогнозованими, виходячи з попереднього аналізу структурних схем надійності. Підтверджують результати попереднього етапу досліджень.

Найбільшу безвідмовність мають структури  $S_3$ ,  $S_7$ ,  $S_6$ . Найменшу безвідмовність має структура  $S_2$ , середній рівень безвідмовності з невеликими відмінностями – структури  $S_1$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_8$ . Ці висновки зберігаються і рівень різниці між цими групами структур у безвідмовності зростає при зменшенні безвідмовності засобів оброблення інформації.

На підставі розрахунків можуть бути сформульовані рекомендації щодо вибору резервованих структур, а запропоновані аналітичні залежності використано для розрахунку показників безвідмовності і функційної безпеки.



**Рис. 10.** Результати моделювання першого набору вихідних даних (табл. 3)



**Рис. 11.** Результати моделювання сімнадцятого набору вихідних даних (табл. 3)

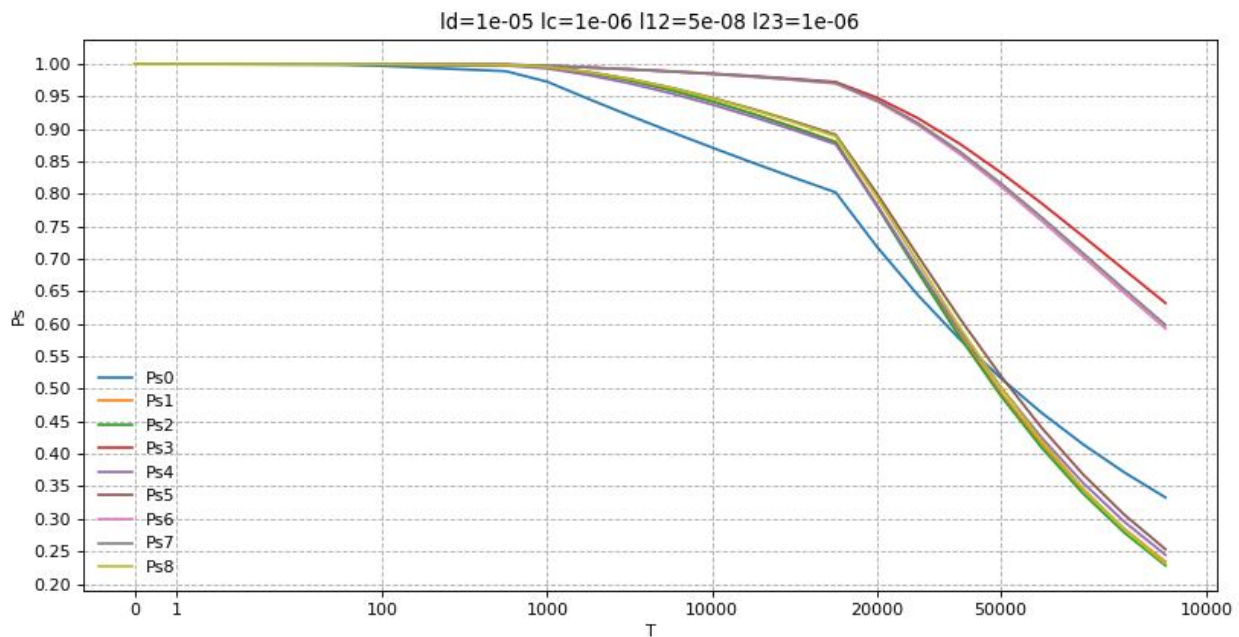


Рис. 12. Результати моделювання останнього набору вихідних даних (табл. 3)

### Висновки

В статті, по-перше, розроблено структурні схеми надійності для низки резервованих структур з різними варіантами каскадів «2-3-3» і «1-3-2» з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій; по-друге, запропоновано аналітичні моделі безвідмовності (функційної безпечності у разі, якщо йдеться про системи аварійного захисту) для отримання оцінок ймовірності безвідмовної роботи для цих структур; по-третє, проведено дослідження

аналітичних моделей для різних значень інтенсивностей відмов елементів і часу використання і сформульовано рекомендації щодо їх використання резервовані структури складних систем.

У подальшому доцільно розробити метод розрахунку надійності (безвідмовності) і функційної безпечності для багаторушних інформаційно-комунікаційних систем з різними варіантами вузлового і мережного резервування «2-3-3» і «1-3-2», базуючись на одержаних у даній статті аналітичних моделях.

### REFERENCES

1. Polovko A.M. (1964), *Fundamentals of the theory of reliability*, Nauka, Moscow, 448 p.
2. Daniel P., Siewiorek and Robert S., Swarz (1998), *Reliable Computer Systems: Design and Evaluation*, Peters Ltd, 932 p.
3. Martin L., Shooman (2002), *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 546 p.
4. Osmo, Siirto, Jukka, Vepsäläinen, Aki, Hämäläinen and Mika, Loukkalahti (2017), "Improving reliability by focusing on the quality and condition of medium voltage cables and cable accessories", *24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, Glasgow, 12-15 June 2017, pp. 229-232.
5. Bruce, Broussard (2007), *Specifying Cable System Reliability*, Pure Power, June 2007, pp. 26-30.
6. Kharchenko, V.S., Lysenko, I.V., Sklyar, V.V. and Herasimenko O.D. (2005), "Safety and Reliability Assessment and Choice of the Redundant Structures of Control Safety Systems", *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'05)*, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, pp. 212-218.
7. Babeshko, E., Kharchenko, V., Leontiiiev, K., Ruchkov, E. and Sklyar V. (2018), "Reliability Assessment of Safety Critical System Considering Different Communication Architectures", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, Kyiv, Ukraine, pp. 18-21.
8. Babeshko, E., Illiashenko, O., Kharchenko, V. and Ruchkov, E. (2020), "NPP Instrumentation and Control systems safety and reliability assessment considering different communication architectures", *Nuclear and Radiation Safety*, 2 (86), pp.38-43.
9. (2017), Threats to Undersea Cable Communications, available at: <https://www.dni.gov/files/PE/Documents/1---2017-AEP-Threats-to-Undersea-Cable-Communications.pdf>

Received (Надійшла) 12.08.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.10.2020

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Ручков Євген Валентинович** – начальник відділу супроводження КБ АСУ ТП, Науково-виробниче підприємство «Радій», Кропивницький, Україна.

**Eugene Ruchkov** – head of support department, Research and production corporation "Radiy", Kropyvnytskyi, Ukraine  
e-mail: [rev@radiy.com](mailto:rev@radiy.com); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4570-9844>.



**Харченко В'ячеслав Сергійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

**Vyacheslav Kharchenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [v.kharchenko@csn.khai.edu](mailto:v.kharchenko@csn.khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

**Коваленко Андрій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Andriy Kovalenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [andriy\\_kovalenko@yahoo.com](mailto:andriy_kovalenko@yahoo.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2817-9036>.

**Бабешко Євген Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна;

**Ievgen Babeshko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cyber Security Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [e.babeshko@csn.khai.edu](mailto:e.babeshko@csn.khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4667-2393>.

**Порошенко Антон Ігорович** – студент, кафедра електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Anton Poroshenko** – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;  
e-mail: [anton.poroshenko@nure.ua](mailto:anton.poroshenko@nure.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7266-4269>.

### Оценивание безотказности резервированных структур «2 из 3» и «1 из 2» с учетом средств обработки информации и коммуникаций

Е. В. Ручков, В. С. Харченко, А. А. Коваленко, Е. В. Бабешко, А. И. Порошенко

**Аннотация.** Предметом исследований статьи являются резервированные структуры сложных систем (РСС), в частности, управляющих систем безопасности АЭС, энергосетей, аэрокосмических систем, других комплексов критического применения (ККП). Целью является разработка и исследование моделей надежности (безотказности) таких РСС с учетом средств обработки информации и коммуникаций ККП. **Задачи:** 1) сформировать множество РСС, основанных на мажоритарном резервировании по принципу «2-из-3» и дублировании по принципу «1-из-2» средств обработки информации и коммуникаций при последовательно-параллельных и мостиковых соединениях элементов; 2) разработать структурные схемы надежности (ССН), математические (аналитические) модели безотказности РСС с каскадным резервированием «2-из-3» и «1-из-2»; 3) исследовать эти модели и определить зависимости вероятностей безотказной работы различных РСС от времени, интенсивностей отказов средств обработки информации и коммуникаций, мажоритарных элементов, элементов «1-из-2»; 4) сформулировать рекомендации по выбору типов РСС в зависимости от значений входных параметров и требований к системам. Для этого использовались методы теории множеств, теории вероятностей, комбинаторного анализа. Получены следующие **результаты.** Предложено множество РСС с различными вариантами резервирования и соединения ярусов «2-из-3», разработаны и исследованы соответствующие ССН и математические модели безотказности и сформулированы рекомендации по их использованию в зависимости от входных параметров. **Выводы.** Научная новизна полученных моделей состоит в следующем: они предоставляют аналитическую оценку для РСС с различными вариантами каскадов «2-из-3» и «1-из-2 с учетом средств обработки информации и коммуникаций ККП.

**Ключевые слова:** резервирование; оценивание; структура; безотказность; обработка информации; логика; коммуникации.

### Reliability assessment of "2oo3" and "1oo2" redundant structures taking into account the means of information processing and communications

Eugene Ruchkov, Vyacheslav Kharchenko, Andriy Kovalenko, Ievgen Babeshko, Anton Poroshenko

**Abstract.** The **subject matter** of the paper is the redundant structures of complex systems (RCS), in particular, safety control systems for nuclear power plants, power grids, aerospace systems, and other critical application complexes (CAP). The **goal** is to develop and study models of reliability (availability) of such RCS taking into account the means of information processing and communications of the CAP. The **tasks** to be solved are: 1) to form a set of RCS based on majority voting according to the "2oo3" principle and redundancy according to the "1oo2" principle of information and communication processing facilities with serial-parallel and bridge connections of elements; 2) to develop reliability block diagrams (RBD), mathematical (analytical) models of reliability of RCS with cascade redundancy "2oo3" and "1oo2"; 3) to study these models and determine the dependences of the probabilities of failure-free operation of various RCSs on time, the failure rates of information processing and communication facilities, voting elements, 1oo2 elements; 4) formulate recommendations for the selection of RCS types depending on the values of input parameters and requirements for systems. For this, the **methods** of set theory, probability theory, combinatorial analysis were used. The following **results** were obtained. A set of RCSs with various options for redundancy and connection of layers "2oo3" have been proposed. The corresponding RBDs and mathematical models of reliability have been developed and researched, and recommendations have been formulated for their use depending on the input parameters. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained models is as follows: they provide an analytical assessment for the RCS with various variants of the 2oo3 and 1oo2 cascades, taking into account the information processing and communication facilities of the CAP.

**Keywords:** reservation; assessment; structure; reliability; data processing; logics; communications.