

РОЗРОБЛЕННЯ РОЗШИРЕНОГО КЛАСИФІКАТОРУ ДЛЯ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДИВЕРСНОСТІ ТА ВАРТОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ АЕС

*Артем Панарін, аспірант, Вячеслав Харченко, д.т.н, проф., Георгій Землянко, д-р філос.
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна;
e-mail: a.panarin@csn.khai.edu, v.kharchenko@csn.khai.edu, g.zemlynko@csn.khai.edu*

Анотація

У статті представлено новий класифікатор видів диверсності (версійної надмірності) для інформаційно-керуючих систем (ІКС) АЕС, який суттєво доповнює відомий класифікатор за стандартом NUREG-7007 шляхом додавання підвидів диверсності з врахуванням процесів виробництва та можливостей технологій FPGA. Запропоновано методику експертного оцінювання метрик диверсності та вартості реалізації альтернативних архітектурних рішень в ІКС АЕС на основі розширеного класифікатора NUREG-7007. Враховуючи складність формалізації понять диверсності та вартості у критичних системах, було запропоновано адаптовану графову модель класифікатора, яка дозволяє оцінювати як окремі гілки (підмножини видів диверсності), так і повні мульти-шляхи (для сукупності підмножин видів версійної надмірності) реалізації. Проведено анкетування експертів із використанням розробленої шкали нормованих оцінок, оброблено отримані дані з урахуванням ранжування, нормалізації та корекції за вагою рівня. Запропоновано принципи оцінки метрик вартості та диверсності. На підставі нового класифікатора розроблено метод, який дозволяє виявляти (відбирати) конфігурації з оптимальним співвідношенням «вартість/диверсність», підтримуючи інженерні рішення на ранніх етапах проєктування. Результати можуть бути використані для побудови автоматизованих інструментів вибору архітектур багатоверсійних керуючих систем безпеки атомної енергетики, авіації та критичної інфраструктури.

Ключові слова

Експертне оцінювання, диверсність, вартість реалізації, графова модель, інформаційно-керуючі системи, NUREG-7007.

1. Вступ

Забезпечення функційної безпечності інформаційно-керуючих систем (ІКС), зокрема систем аварійного захисту реакторів АЕС, систем керування літаків, систем залізничної автоматики вимагає використання принципу диверсності [1-3]. Сутність цього принципу полягає у використанні так званої версійної надмірності процесів (розроблення, верифікації, валідації та обслуговування), вихідних та кінцевих продуктів (електронних компонентів, програмних і апаратних засобів платформ) [1,4,5].

Зрозуміло, що використання диверсності вимагає додаткових ресурсів. Для прийняття рішень стосовно оцінювання ефективності видів диверсності, яка використовується, або тих, які видів, які обираються для використання, необхідно мати деталізований класифікатор.

Першим класифікатором, які найбільш детально узагальнив види диверсності, було надано в стандарті NUREG7007, опублікованому у 2009 році [6]. За час після його публікації науковці та інженери-розробники зробили суттєві кроки вперед і надали приклади нових варіантів версійної надмірності [7-9].

2. Недоліки

Розвиток і впровадження нових технологій, платформних рішень, зокрема, на програмовній логіці (FPGA) [4,10] створюють можливості удосконалення класифікаційних схем диверсності та методик оцінювання впливу її видів на зменшення ризиків на відмову за загальною причиною (common cause failure, CCF) [7,11]. Однак у відомих публікаціях є певна невизначеність щодо врахування таких можливостей та створення класифікаторів, які б об'єднали види диверсності на різних організаційних, проєктних та технологічних рівнях [12]. Крім того, потребують вдосконалення методи оцінювання диверсності з врахуванням розширених класифікацій [4,10,13,14].

3. Мета

Метою дослідження є підвищення точності оцінювання і вибору видів диверсності багатоверсійних ІКС, які

враховують нові можливості, зокрема, технології програмовної логіки (FPGA). Задачі дослідження:

- ~ розроблення розширеного класифікатора диверсності, який має чотирирівневу структуру з додатковими рівнями, які відповідають додатковим видам диверсності для FPGA-проектів;
- ~ удосконалення методу оцінювання диверсності з використанням експертних знань;
- ~ аналіз результатів експертного оцінювання метрик диверсності і вартості.

4. Розширений класифікатор та постановка задачі оцінювання

Рисунок 1 надає схему запропонованого розширеного класифікатора, в якому додано підвиди диверсності на третьому і четвертому рівнях ієрархії у порівнянні з класифікатором [6]. Четвертий рівень деталізує можливості введення диверсності на рівні електронних проєктів FPGA, а також диверсної синхронізації різних частин резервних каналів. Запропоновані види і підвиди диверсності виділено пунктирним контуром.

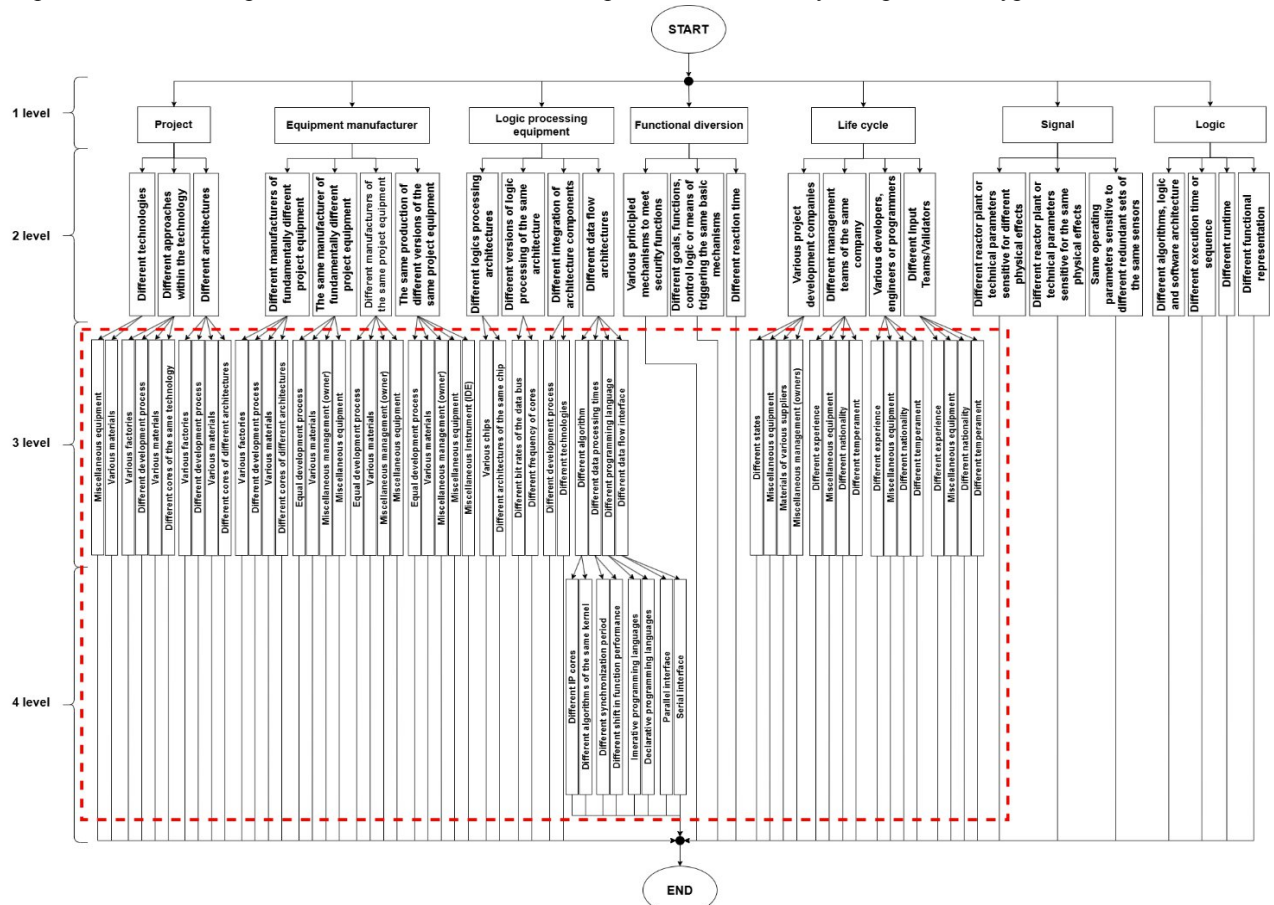


Рис. 1. Розширений класифікатор видів та підвидів диверсності

5. Метод експертного оцінювання диверсності

Розширений класифікатор є базою для оцінювання диверсності для конкретних проєктів ІКС. Для оцінювання, враховуючи неможливість аналітичного визначення метрик диверсності і вартості, запропоновано експертний метод. Завдання експертного оцінювання:

- ~ побудувати повний список можливих гілок класифікатора, включно з усіма рівнями ієрархії (функціональна, програмна, апаратна, організаційна тощо);
- ~ сформулювати ключові питання для оцінювання кожної гілки з огляду на вартість реалізації, рівень різноманітності компонентів, незалежність джерел, ступінь впливу на загальну безпеку системи та інше;
- ~ розробити шкалу оцінювання, яка дозволяє нормувати результати в інтервалі від 0 до 1;
- ~ визначити критерії відбору експертів, які здатні надати обґрунтовані оцінки;
- ~ надати методику обробки результатів, включаючи обчислення середніх значень та загальні метрики шляхів графу.

З метою отримання кількісної інформації щодо ступеня диверсності та очікуваної вартості реалізації кожної окремої гілки класифікатора, було розроблено спеціальний перелік запитань, що винесені на експертне оцінювання. Формулювання запитань базувалося на загальноприйнятих принципах експертних методик, а також враховувало

специфіку побудови двохверсійних архітектур ІКС.

Опитування було розбито на блоки запитань, в кожному з яких надавався перелік від 2 до 7 диверсних компонентів, яким необхідно призначити значення пріоритетності (рангу) від 1 до n в межах поточного блоку для оцінки диверсності та вартості.

Таким чином, було сформовано анкету (рисунк 2), яку заповнювали незалежні експерти відповідаючи на однакові запитання. Отже, для множини гілок була побудована повноцінна матриця відповідей для обчислення середніх значень метрик.

Тест-опитування на тему розширеної класифікації диверсності Nureg-7007

Розставте в кожному пункті опитування пріоритети диверсності (від 1 до k , де 1 - сама висока диверсність, k - кількість пунктів критерію) для різних видів диверсності згідно розширеного класифікатора NUREG- 7007, та відносну вартість впровадження відповідного виду диверсності (від 1 до k , 1 - сама висока вартість). Рівень і відносний пріоритет виду диверсності визначається рівнем ризику відмови за загальною причиною (ВЗП), тобто імовірністю співпадіння відмов обох підсистем - основної і диверсної. Оцінка здійснюється в межах групи 1-26.

№ Запитання	Пріоритет		Коментарі
	Диверсн.	Вартість	
0. Приклад:			
a. Найменший у групі ризик ВЗП, найбільша вартість	1	1	
b. Середній ризик ВЗП, найменша вартість	2	3	
c. Найбільший ризик ВЗП, середня вартість	3	2	
1. Диверсність фундаментальних критеріїв (7 пунктів):			
a. Процес розробки проекту (різні технології, архітектури і т.п.)			
b. Диверсні виробники обладнання проекту			
c. Логічні обробки обладнання (передача та обробка даних архітектури)			
d. Різні функції для досягнення безпеки			
e. Життєвий цикл (різні виробники, програмісти, маркетологи і т.п. при розробці проекту)			
f. Сигнали (вимірювальне обладнання)			
g. Логіка та алгоритми			
2. Диверсність в процесі розробки (3 пункти):			
a. Використання різних технологій (наприклад, мікроконтроллер та FPGA)			
b. Використання різних підходів у рамках однієї технології (наприклад, FPGA та CPLD)			
c. Використання різних архітектур (мікроконтроллер Atmel та ARM)			
3. Диверсність виробників обладнання проекту (4 пункти):			
a. Різний виробник принципово різного виконання обладнання проекту			
b. Один виробник принципово різного виконання обладнання проекту			
c. Різні виробники однакового обладнання проекту			
d. Один виробник різних версій однакового виконання обладнання проекту			

Рис. 2. Ілюстрація анкети розширеного класифікатора

Перелік запитань сформовано у вигляді анкетованої таблиці. Приклад процесу опрацювання одного блоку питань розділу “диверсність фундаментальних критеріїв”, який складається з 7 пунктів, виглядає наступним чином:

Оцініть важливість (пріоритетність) диверсності та вартості в межах від 1 до 7, де 1 – найвища вартість (диверсність), а 7 – сама найнижча вартість (диверсність):

- ~ процес розробки проекту (різні технології, архітектури і т.п.);
- ~ диверсні виробники обладнання проекту;
- ~ логічні обробки обладнання (передача та обробка даних архітектури);
- ~ різні функції для досягнення безпеки;
- ~ життєвий цикл (різні виробники, програмісти, маркетологи і т.п. при розробці проекту);
- ~ сигнали (вимірювальне обладнання);
- ~ логіка та алгоритми.

Експерти оцінювали, наскільки ці елементи дійсно виконують різні функції, базуються на відмінних принципах побудови, або ж належать до різних вендорів, платформ або парадигм. Високий ступінь незалежності — це запорука стійкості системи до відмов CCF.

Приклад опрацювання блоку питань розділу “диверсність в процесі розробки”, який складається з 3 пунктів:

Оцініть важливість (пріоритетність) диверсності та вартості в межах від 1 до 3, де 1 – сама висока вартість (диверсність), а 3 – сама низька вартість (диверсність):

- ~ використання різних технологій (наприклад, мікроконтролер та FPGA);
- ~ використання різних підходів у рамках однієї технології (наприклад, FPGA та CPLD);
- ~ використання різних архітектур (мікроконтролер Atmel та ARM).

Це питання деталізує перше, і фокусується на тому, чи є між складовими помітна різниця у засобах реалізації. Наприклад, два компоненти можуть бути функціонально незалежними, але при цьому побудовані на одній платформі, або розроблені одним постачальником — тоді рівень різноманітності буде низьким.

Усі відповіді (пріоритети) мали бути нормованими за шкалою від 0 до 1, з кроком у 0.01, де 0 — мінімальне значення (наприклад, повна подібність або мінімальні витрати), а 1 — максимальне (максимальна відмінність або найбільші очікувані витрати).

Оцінювання здійснювалось окремо для кожної гілки класифікатора, причому незалежно один від одного, без підказок або наведених факторів. Також, перед проведенням опитування, експертам було надано коротке пояснення термінів, приклади з реальних систем, а також уніфіковану інструкцію з описом процедури. Це дозволило значно

зменшити розкид оцінок та покращити узгодженість між респондентами.

Після завершення етапу експертного анкетування було здійснено комплексну обробку зібраних даних, яка включала попередню перевірку, систематизацію, числову обробку та статистичний аналіз отриманих оцінок. Метою обробки було переведення індивідуальних експертних суджень у агреговані кількісні метрики, які б могли бути безпосередньо використані в рамках графової моделі класифікатора.

Кожен експерт надавав оцінки у вигляді електронної таблиці, в якій кожна гілка поточної вершини класифікатора була окремим рядком, а два параметри оцінювання (диверсність та вартість реалізації) — стовпцями.

Після отримання результатів від експертів, було сформовано матрицю розміром $M \times N \times I$, де M — кількість гілок (об'єктів оцінювання, в нашому випадку 28), N — кількість експертів (в нашому випадку 10), I — кількість критеріїв оцінювання (в нашому випадку 2: диверсність та вартість). Кожна клітинка містить числове значення пріоритету у діапазоні $1 \dots n$, де n — кількість гілок у вершини поточного рівня (рисунк 3).

Тест-опитування на тему розширеної класифікації диверсності Nureg-7007																									
		Експ. 1		Експ. 2		Експ. 3		Експ. 4		Експ. 5		Експ. 6		Експ. 7		Експ. 8		Експ. 9		Експ. 10					
№	Запитання	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.	Див.	Вар.
a.	Самий пріоритетний та найдорожчий пріоритет	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b.	Звичайний але дешевий пріоритет	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
c.	Низький пріоритет з середньою вартістю	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
1.	Диверсність фундаментальних критеріїв (7 пунктів):																								
a.	Процес розробки проекту (різні технології, архітектури і т.п.)	1	1	4	2	1	1	1	1	1	1	2	3	1	5	6	4	3	2	1	1				
b.	Диверсні виробники обладнання проекту	2	3	6	4	3	2	1	1	6	7	1	1	6	7	7	7	2	4	2	2				
c.	Логічні обробки обладнання (передача та обробка даних архітектури)	5	6	5	6	2	2	1	1	4	6	3	4	3	4	4	2	6	7	2	2				
d.	Різні функції для досягнення безпеки	4	4	1	3	1	3	1	1	2	4	5	5	7	3	3	4	4	5	2	2				
e.	Життєвий цикл (різні виробники, програмісти, маркетологи і т.п. при розробці проекту)	3	2	2	1	2	1	1	1	7	2	4	2	5	6	5	6	1	1	1	1				
f.	Сигнали (вимірювальне обладнання)	7	5	7	5	2	2	1	1	3	5	7	6	4	2	1	1	7	3	2	3				
g.	Логіка та алгоритми	6	7	3	7	1	3	1	1	5	3	6	7	2	1	2	1	5	6	1	2				
2.	Диверсність в процесі розробки (3 пункти):																								
a.	Використання різних технологій (наприклад, мікроконтроллер та FPGA)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1				
b.	Використання різних підходів у рамках однієї технології (наприклад, FPGA та CPLD)	3	3	3	3	1	2	2	3	3	2	2	2	2	1	1	3	3	2	2					
c.	Використання різних архітектур (мікроконтроллер Atmel та ARM)	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2				
3.	Диверсність виробників обладнання проекту (4 пункти):																								
a.	Різний виробник принципово різного виконання обладнання проекту	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	1	3	2	2				
b.	Один виробник принципово різного виконання обладнання проекту	2	2	2	2	2	1	1	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	3	3	3				
c.	Різні виробники однакового обладнання проекту	3	3	4	3	1	2	3	1	2	2	2	2	2	3	3	2	1	2	2					
d.	Один виробник різних версій однакового виконання обладнання проекту	4	4	3	4	3	3	3	3	4	4	4	4	1	1	1	1	4	4	2	2				
4.	Диверсність логічної обробки обладнання (4 пункти):																								
a.	Різні логічні обробки архітектури (обробка даних за допомогою vhdл-функцій або Nios-ядром)	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	4	4	4	3	1	2	1	2				
b.	Різні логічні версії обробки однакової архітектури (наприклад, різна розрядність даних мегафункцій)	4	4	3	4	2	2	3	3	4	3	3	3	3	3	1	1	2	1	3	3				
c.	Різні інтеграції компонентів архітектури	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	4	3	2	2				
d.	Різні потоки даних архітектури (послідовний та паралельний інтерфейс передачі даних)	3	3	4	3	2	2	2	2	3	4	4	4	1	1	3	4	3	4	2	2				
5.	Диверсність функцій для досягнення безпеки (3 пункти):																								
a.	Різні базові механізми для досягнення безпеки	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	3	2	3	2	1	2	2				
b.	Різні цілі, функції, керуюча логіка або засоби спрацювання однакових базових механізмів	2	2	2	2	2	3	1	1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	2	1	1				
c.	Різний час відгуку	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3				
6.	Диверсність життєвого циклу розробки проекту (4 пункти):																								
a.	Різні компанії розробки проекту	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	3	1	1	1				
b.	Різні менеджери в межах однієї компанії	4	4	4	4	2	3	3	1	4	4	4	4	3	3	1	1	4	3	2	2				
c.	Різні інженери, схемотехніки та програмісти	2	3	2	2	2	3	1	1	2	2	2	2	2	3	2	1	2	2	2					
d.	Різні тестувальники, верифікатори та виконавці	3	2	3	3	2	3	1	1	3	3	3	2	1	1	2	3	2	4	2	2				
7.	Диверсність вимірювальних пристроїв (3 пункти):																								
a.	Різні реакторні або технологічні параметри, чутливі до різних фізичних впливів	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	3	3	3	3	1	1	2	2				
b.	Різні реакторні або технологічні параметри, чутливі до однакових фізичних впливів	2	2	2	2	2	2	1	1	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2				
c.	Однаковий технологічний параметр, чутливий до різних надлишкових однакових датчиків	3	3	3	3	3	3	2	2	3	1	2	1	1	2	1	1	3	3	2	2				
8.	Диверсна логіка та алгоритми (3 пункти):																								
a.	Різні алгоритми, логіка та програмна архітектура	1	1	1	1	1	3	1	2	1	1	1	1	3	3	3	3	1	2	1	1				
b.	Різний час або порядок виконання	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	1	1	3	1	3	3				
c.	Різні функціональні представлення	2	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	3	2	2				
9.	Диверсність у використанні різних технологій при розробці проекту (2 пункти):																								
a.	Різне обладнання	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1				
b.	Різні матеріали	2	2	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1				
10.	Диверсність у використанні різних підходів у рамках однієї технології (4 пункти):																								
a.	Різні заводи виробники	4	4	1	1	2	1	3	1	3	1	1	1	4	4	4	4	4	1	2	1				
b.	Різні інженерні процеси	3	3	3	3	2	1	2	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1				
c.	Різні матеріали	2	2	2	2	2	2	3	1	2	3	2	3	2	2	1	2	2	2	1	1				
d.	Різні ядра в рамках однієї технології	1	1	4	4	1	2	2	2	4	4	4	4	1	1	2	1	1	4	2	2				

Рис. 3. Агреговані результати експертного оцінювання розширеного класифікатора

На основі зібраних даних обчислюються часткові метрики диверсності та вартості для кожного розглянутого компонента.

Етапи проведення розрахунків:

1. Обчислення для кожного питання окремо середньої арифметичної між всіма експертами.
2. Ранжування середніх оцінок в рамках одного блоку з встановленням пріоритетів, що повертає те ж саме ранжування, але вже з урахуванням оцінок всіх експертів.
3. Нормалізована сума обернених чисел компонентів поточного рівня дає змогу отримати метрики поточного блоку з сумою 1.
4. Даний алгоритм обраховується однаково для отримання метрик диверсності та вартості окремо.

В кількох випадках були зафіксовані аномально високі дисперсії, коли один або два експерти суттєво відрізнялися у своїх оцінках від інших. У таких випадках проводився перехресний аналіз пояснень, наданих експертами (в коментарях до анкет), та перевірка чіткості формулювання гілки. Усі виявлені аномалії мали пояснення, пов'язані з інтерпретацією або специфікою досвіду конкретного експерта, тому оцінки були залишені без змін.

Для отримання інтегральних метрик диверсності та вартості (не окремих гілок, а повного шляху в графі класифікатора), було застосовано формулу, яка враховує:

- ~ структуру шляху (позицію вершини в маршруті),
- ~ вагу оцінки на кожному етапі (чим ближче до початку шляху — тим важливіше),
- ~ кількість компонентів поточного рівня, що дозволяє справедливо розподіляти вагу.

6. Результати оцінювання

Після завершення збору та обробки експертних оцінок було отримано детальну картину розподілу значень метрик диверсності (Dtgen) та вартості реалізації (Costgen) по всіх гілках графової структури розширеного класифікатора. Це дозволило провести первинну аналітичну інтерпретацію отриманих даних і сформулювати перші висновки щодо доцільності включення окремих гілок до проектних конфігурацій майбутніх інформаційно-керуючих систем. Під час проведення аналізу доцільності використання метрик розширеного класифікатора, результати були згруповані за рівнями ієрархії, а також класифіковані за діапазонами отриманих оцінок. Зокрема, було виокремлено три умовні групи за кожною метрикою:

- ~ низьке значення: 0.00–0.33;
- ~ середнє значення: 0.34–0.66;
- ~ високе значення: 0.67–1.00.

Ці діапазони дозволили сформувати зрозумілу картину щодо того, які гілки класифікатора мають високу вартість реалізації, але водночас не дають суттєвої диверсності, і навпаки.

В результаті аналізу було виявлено, що:

- ~ понад 60% вершин потрапили до середнього діапазону за обома метриками — це свідчить про баланс між ефективністю та витратами;
- ~ 12% вершин мали високу диверсність, але супроводжувалися надзвичайно високою вартістю реалізації — їх рекомендовано лише для критичних систем з високими вимогами до надійності;
- ~ 8% вершин мали низьку вартість та водночас середню або високу диверсність — ці варіанти особливо цінні для розробки економічно ефективних архітектур.

Висновки

Побудований класифікатор суттєво розширює ієрархію видів і підвидів диверсності для ІКС, які будуються на FPGA-платформах, та надає можливість для більш точного і об'єктивного оцінювання диверсності. Проведене експертне оцінювання дозволило створити кількісну базу для аналізу гілок класифікатора диверсності. Залучення висококваліфікованих фахівців, чітке формулювання запитань, коректна методика оцінювання та належна обробка результатів забезпечили високу якість зібраних даних.

Оцінювання показників вартості реалізації (Costgen) та диверсності (Dtgen) для кожної гілки графової моделі класифікатора надає можливість отримати цілісне уявлення про потенційні переваги та недоліки різних варіантів системних конфігурацій.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути введення додаткових вершин та рівнів розширеного класифікатора для розширення галузей застосування, а також потреб авіаційної, військової або транспортної сфер. Таким чином, проведене дослідження не лише дозволяє використовувати сформований класифікатор як теоретичну модель, але й дає змогу інтегрувати результати в інструменти підтримки інженерних рішень на практиці.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-якого фінансового або іншого можливого конфлікту, який стосується цієї роботи.

Список літератури

- [1] M. A. Yastrebenetsky and V. S. Kharchenko, *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control*

- Systems*. IGI Glob., 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3277-5>
- [2] I. Malynyak, "Functional diversity design of safety-related systems," *The Educational Review, USA*, vol. 2, no. 1, Jan. 2018. Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26855/er.2018.01.004>
- [3] M. Kolisnyk, I. Piskachova, and V. Kharchenko, "The method of diversity-based ensuring the reliability of the router in the iiot system," *International Journal of Computing*, pp. 324–332, Oct. 2024. Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.3.3651>
- [4] O. Illiashenko, V. Kharchenko, L. Kor, A. Panarin, and V. Sklyar, "Hardware diversity and modified 7007 NUREG/CRbased assessment of NPP I&C safety," in *2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Bucharest, Sep. 21–23, 2017. IEEE, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/idaacs.2017.8095218>
- [5] V. V. Frolov, "ANALYSIS OF APPROACHES PROVIDING SECURITY OF CLOUD SERVICES," *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 1, pp. 70–82, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.1.07>
- [6] U. S. N. R. Commission, "Diversity strategies for nuclear power plant instrumentation and control systems," Office of Nuclear Regulatory Research, 2010.
- [7] H. W. Jones, "Common cause failures dominate and defeat redundancy," in *2025 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Destin, FL, USA, Jan. 27–30, 2025. IEEE, 2025, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/rams48127.2025.10935209>
- [8] V. Kharchenko, "Diversity for safety and security of embedded and cyber physical systems: Fundamentals review and industrial cases," in *2016 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, Tallinn, Estonia, Oct. 3–5, 2016. IEEE, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/bec.2016.7743719>
- [9] S. Jha et al., "Exploiting temporal data diversity for detecting safety-critical faults in AV compute systems," in *2022 52nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*, Baltimore, MD, USA, Jun. 27–30, 2022. IEEE, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/dsn53405.2022.00021>
- [10] V. Kharchenko, Y. Ponochovnyi, I. Babeshko, E. Ruchkov, and A. Panarin, "Safety assessment of maintained control systems with cascade two-version 2oo3/1oo2 structures considering version faults," in *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer Nat. Switz., 2023, pp. 119–129. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-37720-4_11
- [11] J. R. Belland, "Modeling common cause failures in diverse components with fault tree applications," in *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Orlando, FL, Jan. 23–26, 2017. IEEE, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ram.2017.7889659>
- [12] V. Frolov, O. Frolov, and V. Kharchenko, *Classification of Diversity for Dependable and Safe Computing*. Germany: Nat. Aerosp. Univ. named after N. Y. Zhukovsky "KhAI", 2019. [Online]. Available: <https://coilink.org/20.500.12592/9ntxfqq>
- [13] H. Singh, B. Weng, S. J. Rao, and D. Elsasser, "A diversity analysis of safety metrics comparing vehicle performance in the lead-vehicle interaction regime," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–18, 2023. Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tits.2023.3290261>
- [14] M. Kolisnyk, I. Piskachova, and V. Kharchenko, "Reliability models of diverse majority-redundant systems with threshold adaptation," in *2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, Oct. 11–13, 2024. IEEE, 2024, pp. 1–7. Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/dessert65323.2024.11122217>

ISSN: 2617-846X (online)

Харченко Вячеслав Сергійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

Панарін Артем Сергійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-8425>

Землянюк Георгій Андрійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4153-7608>

Дата отримання статті -17.11.25.

Дата отримання фінального варіанту – 5.12.25.

Дата публікації- 30.12.25.