

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ SERC ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОХИБКИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ РЕКОНФІГУРОВНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ

Розглядаються питання розрахунку імовірності безвідмовної роботи відмовостійких реконфігурованих багатопроекторних систем. Дається коротке описання розробленого програмного забезпечення SERC (Statistical Experiments for Reliability Calculation), в якому реалізовано відомі та запропоновані модифікації методу статистичних випробувань для розрахунку показників надійності ВБС та засоби для оцінки похибки розрахунку.

Ключові слова: багатопроекторні системи, відмовостійкість, імовірність безвідмовної роботи, метод статистичних випробувань, похибка методу статистичних випробувань.

Вступ

Відмовостійкі реконфігуровані багатопроекторні системи (ВБС) знаходять своє застосування у системах керування складними об'єктами (авіаційні та космічні системи, системи управління АЕС, системи керування великим виробництвом та ін.). До ВБС встановлюються високі вимоги по надійності, так як відмови таких систем можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Реальні ВБС критичного застосування можуть містити сотні процесорів, часто ВБС є неоднорідними (тобто можуть містити процесори різних типів) і мають багаторівневу ієрархічну структуру. Реакція такої системи на відмови її елементів може описуватися дуже складними математичними залежностями, що робить задачу визначення показників надійності дуже складною. Для певних добре вивчених класів ВБС (зокрема, k-out-of-n системи) розроблено спеціалізовані методи розрахунку показників надійності [1–5]. Для розрахунку показників надійності ВБС, що лежать за межами досліджених класів, більш ефективними можуть бути статистичні методи [6–10]. Зазначимо, що всі статистичні методи мають певну похибку, яка може залежати від багатьох факторів. Очевидно, що для розрахунку показників надійності конкретної ВБС слід застосувати такий статистичний метод, який має найменшу похибку. Актуальною задачею є

розробка нових статистичних методів розрахунку показників надійності ВБС і визначення умов, при яких похибка цих методів є меншою порівняно з іншими методами.

Дана робота присвячена порівнянню методичних похибок різних модифікацій методу статистичних випробувань отриманих за допомогою розробленого програмного забезпечення SERC (Statistical Experiments for Reliability Calculation).

Оцінка імовірності безвідмовної роботи ВБС

Одним із часто використовуваних показників надійності є імовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого проміжку часу. Початковими даними для розрахунку є імовірності безвідмовної роботи елементів системи за той же проміжок часу і модель поведінки системи, яка відображає залежність стану ВБС від станів її елементів. Стан ВБС і стани її елементів представляються булевими змінними (1 – працездатний стан, 0 – відмова). Сукупність булевих змінних, що представляють стани елементів ВБС, називають вектором стану системи. При статистичному моделюванні спеціалізованим генератором формується вектор стану системи, за допомогою моделі поведінки ВБС

визначається стан ВБС, на основі результатів роботи моделі накопичується статистика і визначається імовірність безвідмовної роботи ВБС. Однією з найбільш ефективних моделей поведінки ВБС у потоці відмов автор вважає графологічну модель (GL-модель) [11].

Зазначимо, що в залежності від рівня деталізації, що використовується при побудові моделі поведінки системи, елементами ВБС можуть вважатися окремі підсистеми, процесори, мікросхеми, шини або інші об'єкти. При цьому здатність до реконфігурації мають лише процесори (або підсистеми, які містять процесори), тому саме стани процесорів справляють найбільший вплив на поведінку ВБС. В межах даної роботи будемо вважати, що стан ВБС залежить тільки від станів її процесорів, однак отримані результати можуть бути узагальнені для інших елементів.

Імовірність безвідмовної роботи ВБС може бути записана як:

$$P(y) = \sum_{\mathbf{X} \in B(n)} \varphi(\mathbf{X}) P(\mathbf{X}), \quad (1)$$

де n – кількість елементів системи; $B(n)$ – множина всіх двійкових векторів довжини n ; \mathbf{X} – двійковий вектор стану системи, що представляє стани елементів системи $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; запис $\mathbf{X} \in B(n)$ означає, що додавання виконується для всіх двійкових векторів довжини n ; $P(\mathbf{X})$ – імовірність вектора стану системи \mathbf{X} ; $\varphi(\mathbf{X})$ – стан ВБС, визначений GL-моделлю на векторі \mathbf{X} ($\varphi(\mathbf{X})=1$, якщо система зберігає працездатність в стані \mathbf{X} , $\varphi(\mathbf{X})=0$ у протилежному випадку); x_1, x_2, \dots, x_n – булеві змінні, які відображають стани елементів системи ($x_i = 0$, якщо i -й елемент відмовив, $x_i = 1$, якщо i -й елемент працездатний, $i = 1, \dots, n$); y – булева змінна, що відображає стан системи ($y = 0$, якщо система відмовила, $y = 1$, якщо система працездатна).

Імовірність вектора стану системи $P(\mathbf{X})$, яка використовується у співвідношенні (1), дорівнює:

$$P(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^n p(\tilde{x}_i),$$

де $p(\tilde{x}_i)$ – імовірність стану елемента – імовірність того, що i -й елемент знаходиться в стані, що описується змінною x_i , тобто,

$$p(\tilde{x}_i) = (1 - x_i)q(x_i) + x_i p(x_i),$$

де $p(x_i)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента, $q(x_i) = 1 - p(x_i)$ – імовірність відмови i -го елемента.

Імовірність безвідмовної роботи i -го елемента системи в інтервалі часу від 0 до t обчислюється на основі відомого співвідношення $p(x_i) = e^{-\lambda_i t}$, де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента системи. Величини λ_i табульовані, наприклад, інтенсивності відмов сучасних процесорів та блоків пам'яті складають 10^{-7} – 10^{-6} 1/год, інтенсивності відмов сучасних шин – 10^{-9} – 10^{-8} 1/год. [12, 13]

Кількість доданків у співвідношенні (1) дорівнює $|B(n)| = 2^n$. Очевидно, що при достатньо великих n виконати обчислення у виразі (1) за прийнятний час неможливо. Тому для оцінки імовірності безвідмовної роботи ВБС представляється доцільним застосування методу статистичних випробувань.

Розглянемо основні статистичні оцінки, реалізовані в SERC. В класичній монографії [6] приводиться метод прискорення статистичних випробувань. Згідно зазначеного методу незміщена консистентна статистична оцінка імовірності безвідмовної роботи ВБС може бути записана у такому вигляді:

$$\tilde{P}(y) = \frac{\sum_{\mathbf{X} \in \Omega(n)} \varphi(\mathbf{X}) \cdot \gamma^{-(n-w(\mathbf{X}))}}{L \cdot K},$$

де γ – коефіцієнт, що визначає ступінь прискорення, $\Omega(n)$ – множина двійкових векторів довжиною n , сформованих спеціалізованим генератором, для якого імовірність появи одиниці на i -тій позиції дорівнює,

$$p'(x_i) = \frac{p(x_i)}{p(x_i) + \gamma \cdot q(x_i)},$$

$L = |\Omega(n)|$ – кількість проведених статистичних експериментів, $w(\mathbf{X})$ – вага (кількість одиничних компонент) двійкового вектора \mathbf{X} , K – константа для конкретної ВБС

$$K = \prod_{i=1}^n \frac{1}{p(x_i) + \gamma \cdot q(x_i)}.$$

В роботі [10] запропонована статистична оцінка, яка ґрунтується на проведенні окремих серій статистичних випробувань для кожної ваги m (кількість одиничних компонент) двійкового вектора \mathbf{X} ($0 \leq m \leq n$):

$$\bar{P}(y) = \sum_{m=0}^n \left(\frac{C_n^m}{L_m} \sum_{\mathbf{X} \in \Omega(n,m)} \varphi(\mathbf{X}) P(\mathbf{X}) \right), \quad (2)$$

де $\Omega(n, m)$ – множина псевдовипадкових двійкових векторів довжиною n і вагою m , сформованих спеціалізованим рівноймовірним неповторним генератором, $L_m = |\Omega(n, m)|$ – кількість проведених статистичних експериментів для кожної ваги m . В межах даної роботи метод, що використовує статистичну оцінку (2), будемо називати «методом статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги».

Основні функції розробленого програмного забезпечення і отримані результати

Розроблене програмне забезпечення підтримує можливість виконання таких функцій:

- 1) опис моделі поведінки ВБС у потоці відмов;
- 2) вибір методів для розрахунку показників надійності ВБС:
 - прямий перебір всіх двійкових векторів стану системи;
 - класичний метод статистичного моделювання;
 - прискорене статистичне моделювання;
 - статистичні випробування з моделями поведінки ВБС у потоці відмов для довільних двійкових векторів стану системи;
 - статистичні випробування з моделями поведінки ВБС у потоці відмов для двійкових векторів стану системи із заданою вагою;
 - статистичні випробування з моделями поведінки ВБС у потоці відмов для двійкових векторів стану системи із заданою вагою та імовірністю;
- 3) вибір способів генерування двійкових векторів стану системи:
 - послідовний перебір двійкових векторів;
 - генерування псевдовипадкових двійкових векторів із заданою імовірністю появи одиниці для кожного компонента вектора;
 - генерування рівноймовірних псевдовипадкових двійкових векторів;
 - генерування рівноймовірних псевдовипадкових двійкових векторів без повторень;
 - послідовний перебір двійкових векторів із заданою вагою;
 - генерування рівноймовірних псевдовипадкових двійкових векторів із заданою вагою;
 - неповторне генерування рівноймовірних псевдовипадкових двійкових векторів із заданою вагою [14];
 - генерування рівноймовірних псевдовипадкових двійкових векторів із заданою вагою та імовірністю [10];

4) засоби для оцінки похибок розрахунку:

- обчислення відхилень значень показників надійності, отриманих за допомогою статистичних методів, від точних значень цих показників, отриманих за допомогою прямого перебору (для систем з невеликою кількістю елементів);

- статистична оцінка похибки за результатами проведених випробувань;

- аналітична оцінка похибки до проведення випробувань;

5) способи відображення результатів обчислень: табличне представлення результатів, побудова графіків залежності обчислювальних величин від часу обчислень;

б) вибір точності обчислень: обчислення на основі типу double (до 17 десяткових знаків), обчислення із заданою точністю на основі бібліотеки BigNum, вільно доступної у мережі Internet (<http://www.fractal-landscapes.co.uk/DL/BigNum.zip>).

Приведемо результати, отримані за допомогою розробленого програмного забезпечення, за порівнянням методичних похибок різних модифікацій методу статистичних випробувань.

Розглянемо ВБС, для якої ймовірність безвідмовної роботи на заданому проміжку часу може бути обчислена за короткий час і без використання «подовженої» арифметики. Нехай ВБС має 20 процесорів, а ймовірності відмови процесорів $q(x_1), \dots, q(x_{20})$ мають значення $10^{-3} - 10^{-2}$. При цьому значення ймовірностей працездатних станів системи змінюються від 10^{-18} до $1 - 10^{-2}$, тому для обчислення суми всіх таких значень можна використовувати дійсні числа, представлені типом double. Поведінка ВБС при виникненні відмов процесорів має такий вигляд: при відмові будь-яких чотирьох або менше процесорів ВБС зберігає працездатність, ВБС може зберігати працездатність при відмові деяких п'яти або

шести процесорів, відмова будь-яких семи або більше процесорів призводить до відмови ВБС.

Ймовірність безвідмовної роботи описаної ВБС, обчислена шляхом прямого перебору всіх станів системи за допомогою розробленого програмного забезпечення, дорівнює $1 - 2,7 \cdot 10^{-7}$. При цьому для здійснення обчислень знадобилося 840 мс.

На рис. 1 показано графіки залежності фактичних похибок розрахунку ймовірності безвідмовної роботи описаної ВБС від часу обчислень: “Deviation of ABM(ap)” позначає фактичну похибку методу прискореного статистичного моделювання, “Deviation of EVGW(ap)” позначає фактичну похибку методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги.

Як видно з графіків, величина похибки прискореного статистичного моделювання протягом проведення випробувань зменшується від 10^{-7} до 10^{-8} . Похибка методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги на проміжку 0 – 150 мс. має такий же порядок як і похибка методу прискореного статистичного моделювання, на проміжку 150 – 500 мс. величина похибки зменшується до 10^{-10} , починаючи з 500 мс. величина похибки зменшується до 10^{-20} .

На рис. 2 показано графіки залежності статистичних оцінок похибок розрахунку ймовірності безвідмовної роботи описаної ВБС від часу обчислень: “Err.Stat.Est. of ABM(ap)” позначає статистичну оцінку похибки методу прискореного статистичного моделювання, “Err.Stat.Est. of EVGW(ap)” позначає статистичну оцінку похибки методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги. Порівнявши графіки рис. 1 та рис. 2, можемо переконатися що, фактичні значення похибок не перевищують їх статистичних оцінок.

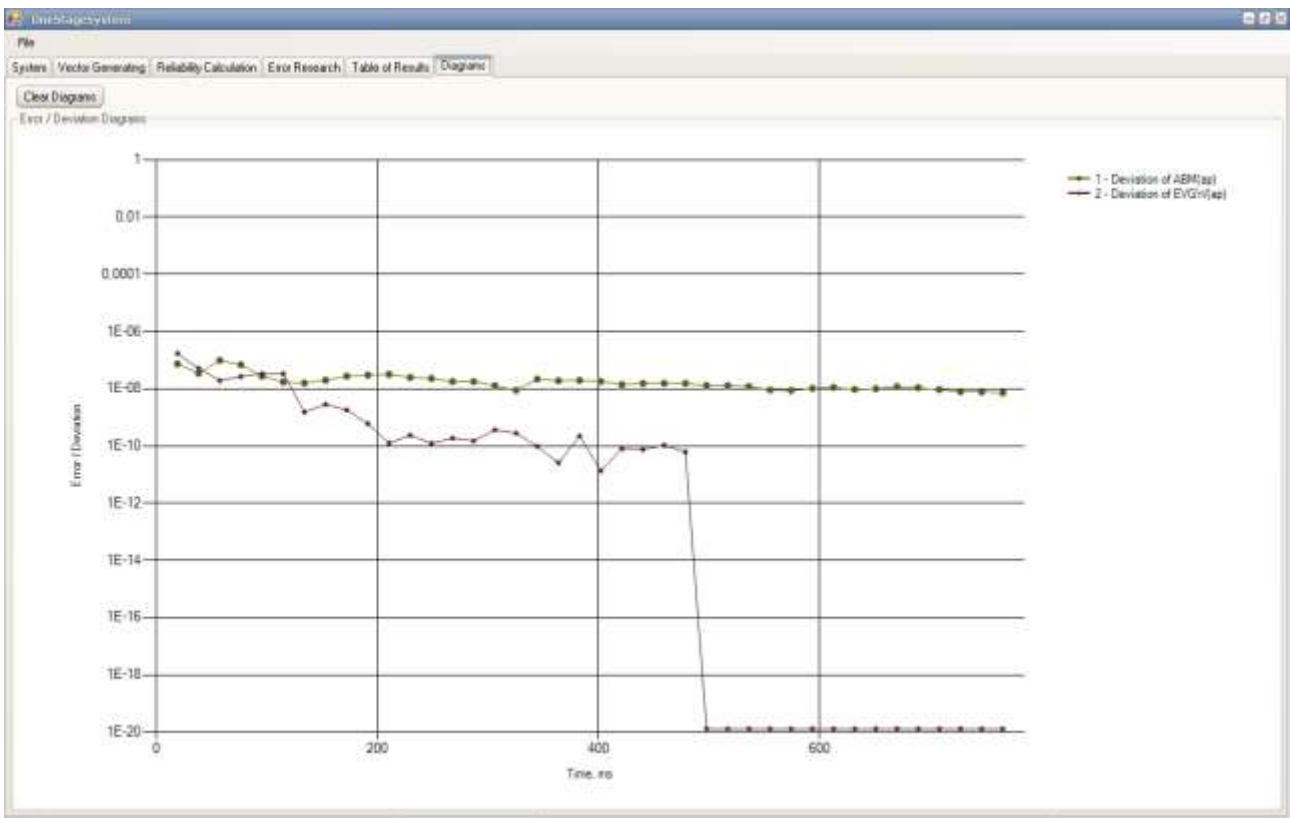


Рис. 1. Графіки фактичних похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи ВБС, що має 20 процесорів, імовірність відмови яких – $10^{-3} - 10^{-2}$

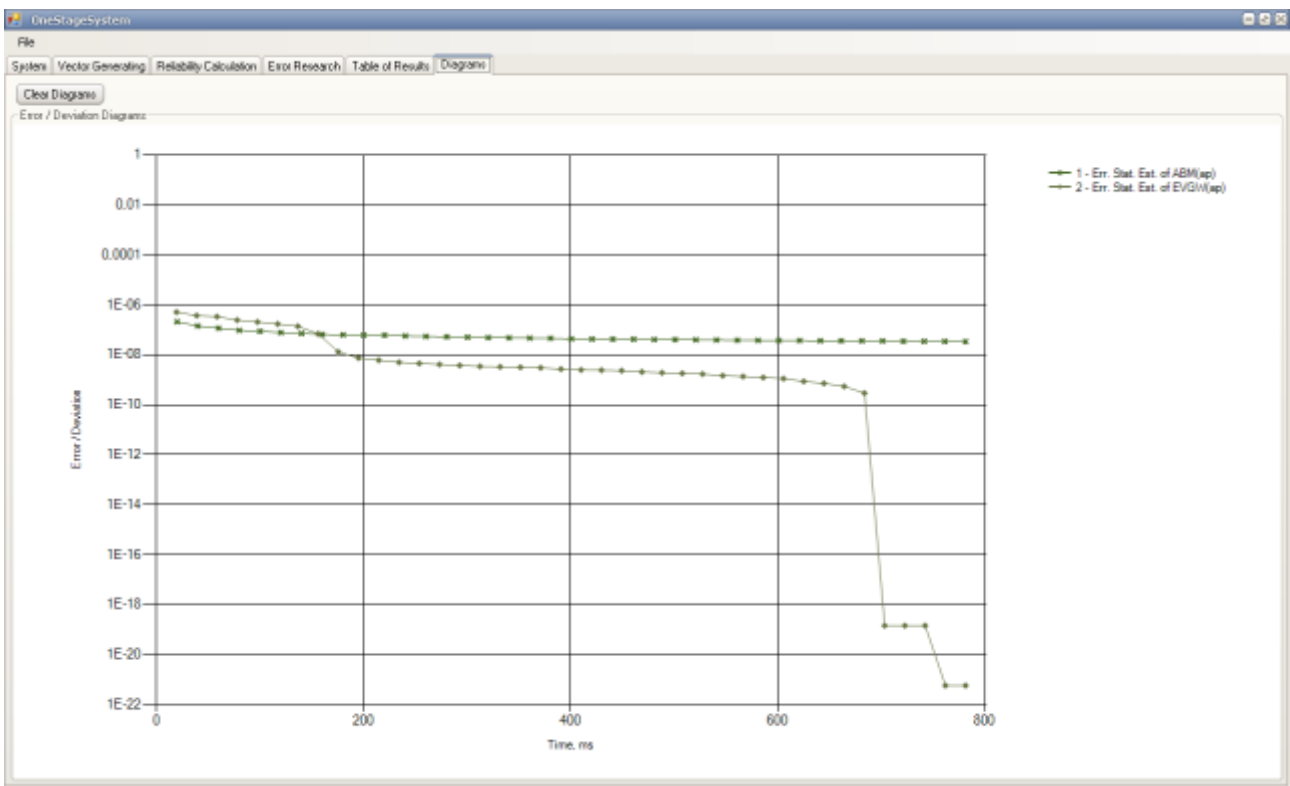


Рис. 2. Графіки статистичних оцінок похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи ВБС, що має 20 процесорів, імовірність відмови яких – $10^{-3} - 10^{-2}$

Розглянемо приклад ВБС, для якої імовірність безвідмовної роботи на заданому проміжку часу може бути обчислена за прийнятний час, але потребує використання «подовженої» арифметики. Припустимо, що ВБС має 20 процесорів, а імовірності відмови процесорів $q(x_1), \dots, q(x_{20})$ мають порядок $10^{-5} - 10^{-4}$. Оскільки значення ймовірностей працездатних станів системи змінюються від 10^{-30} до $1 - 10^{-4}$, то для обчислення суми всіх таких значень необхідно використовувати «подовжену» дійснозначну арифметику. Поведінка ВБС при виникненні відмов процесорів має такий вигляд: при відмові будь-яких чотирьох або менше процесорів ВБС зберігає працездатність, ВБС може зберігати працездатність при відмові деяких п'яти або шести процесорів, відмова будь-яких семи або більше процесорів призводить до відмови ВБС.

Імовірність безвідмовної роботи описаної ВБС, обчислена шляхом прямого перебору всіх станів системи за допомогою розробленого програмного забезпечення, дорівнює $1 - 4,01 \cdot 10^{-19}$. При цьому

для здійснення обчислень знадобилося 4400 мс.

На рис. 3 показано графіки залежності фактичних похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи описаної ВБС від часу обчислень: “Deviation of ABM(ap)” позначає фактичну похибку методу прискореного статистичного моделювання, “Deviation of EVGW(ap)” позначає фактичну похибку запропонованого автором методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги.

Порядок похибки прискореного статистичного моделювання протягом проведення випробувань зменшується від 10^{-19} до 10^{-21} . Похибка методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги на проміжку 0 – 300 мс. має такий же порядок як і похибка прискореного статистичного моделювання. На проміжку 300 – 1300 мс. величина похибки зменшується до 10^{-23} , починаючи з 1300 мс. величина похибки зменшується до 10^{-29} .

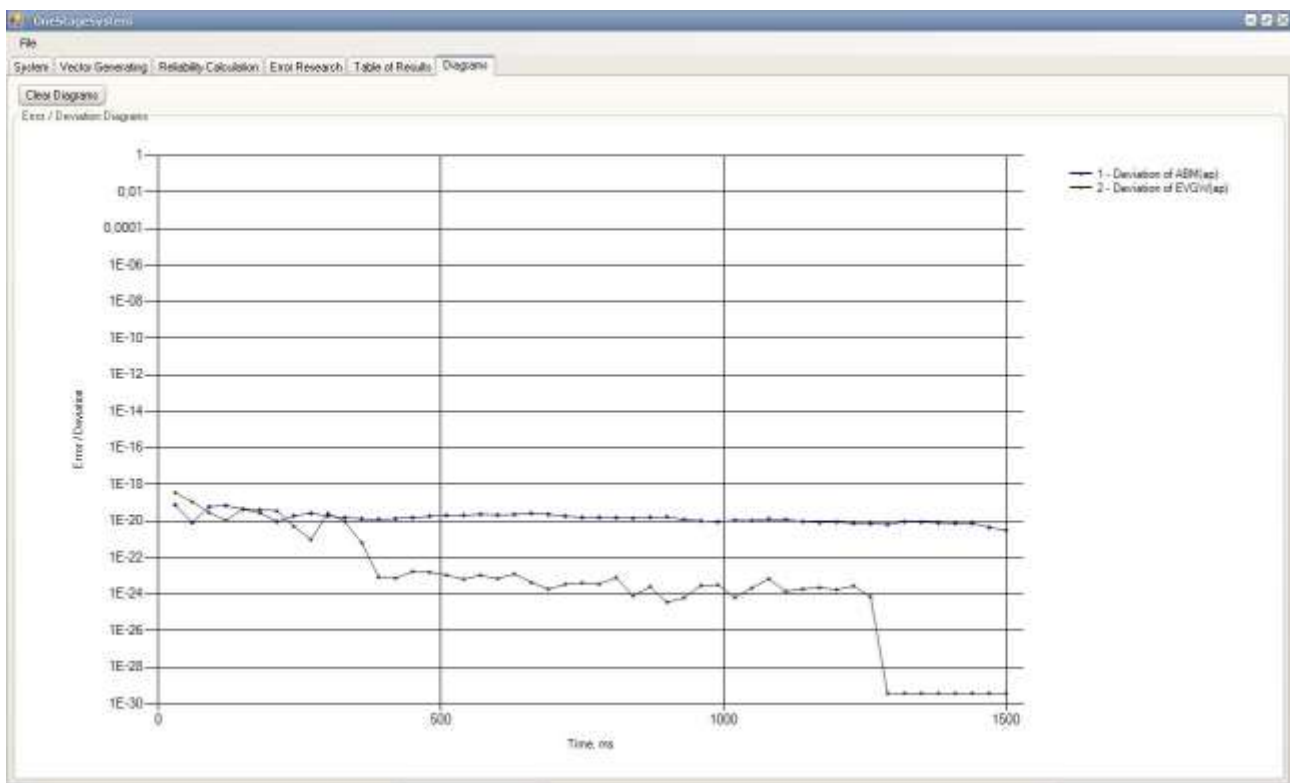


Рис. 3. Графіки фактичних відхилень при оцінюванні імовірності безвідмовної роботи ВБС, що має 20 процесорів, імовірність відмови яких $10^{-5} - 10^{-4}$.

На рис. 4 показано графіки залежності статистичних оцінок похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи описаної ВБС від часу обчислень: “Err.Stat.Est. of ABM(ap)” позначає статистичну оцінку похибки методу прискореного статистичного моделювання, “Err.Stat.Est. of EVGW(ap)” позначає статистичну оцінку похибки методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги. Порівнявши графіки рис. 3 та 4, можемо переконатися що, фактичні значення похибок не перевищують їх статистичних оцінок.

Розглянемо ВБС, для якої імовірність безвідмовної роботи на заданому проміжку часу не може бути обчислена за прийнятний час. Нехай ВБС має 40 процесорів, а імовірності $q(x_1), \dots, q(x_{40})$ відмови процесорів знаходяться у діапазоні $10^{-5} - 10^{-4}$. Значення ймовірностей працездатних станів системи змінюються від 10^{-30} до $1 - 10^{-4}$, тому для обчислення суми всіх таких значень необхідно використовувати «подовжену» дійснозначну арифметику. Поведінка ВБС при виникненні відмов процесорів має такий вигляд: при

відмові будь-яких чотирьох або менше процесорів ВБС зберігає працездатність, ВБС може зберігати працездатність при відмові деяких п’яти або шести процесорів, відмова будь-яких семи або більше процесорів призводить до відмови ВБС. Для обчислення імовірності безвідмовної роботи описаної ВБС шляхом прямого перебору всіх станів системи із використанням «подовженої» арифметики може знадобитися понад 1000 год. машинного часу. Отримана статистична оцінка обчислення імовірності безвідмовної роботи дорівнює $1 - 1,38 \cdot 10^{-16}$. На рис. 5 показано графіки статистичних оцінок похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи описаної ВБС із використанням абсолютної і логарифмічної шкали. Для даної ВБС похибка розрахунку імовірності безвідмовної роботи методом прискорення статистичних випробувань має порядок 10^{-17} (що складає близько 10 % відносно імовірності відмови ВБС), а похибка розрахунку імовірності безвідмовної роботи методом статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги має порядок 10^{-18} (менше 1 % відносно імовірності відмови ВБС).

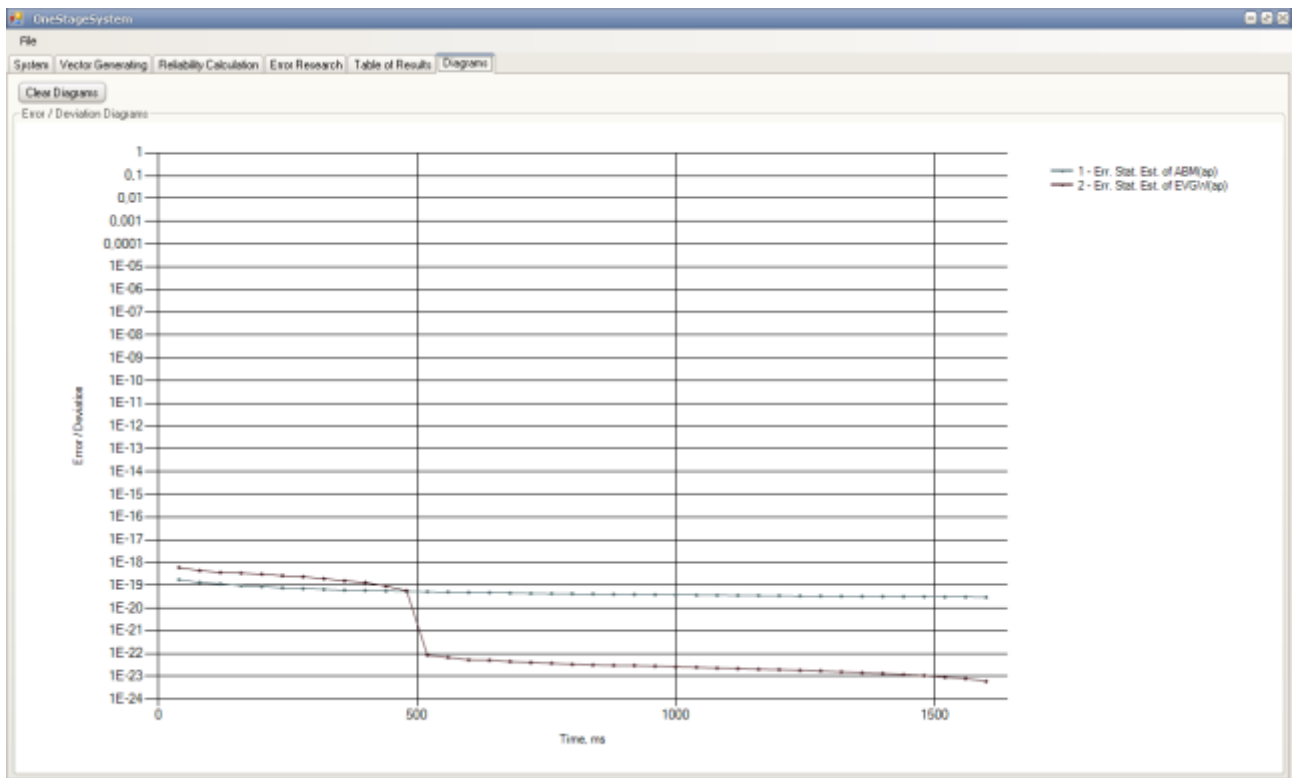


Рис. 4. Графіки статистичних оцінок похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи ВБС, що має 20 процесорів, імовірність відмови яких – $10^{-5} - 10^{-4}$

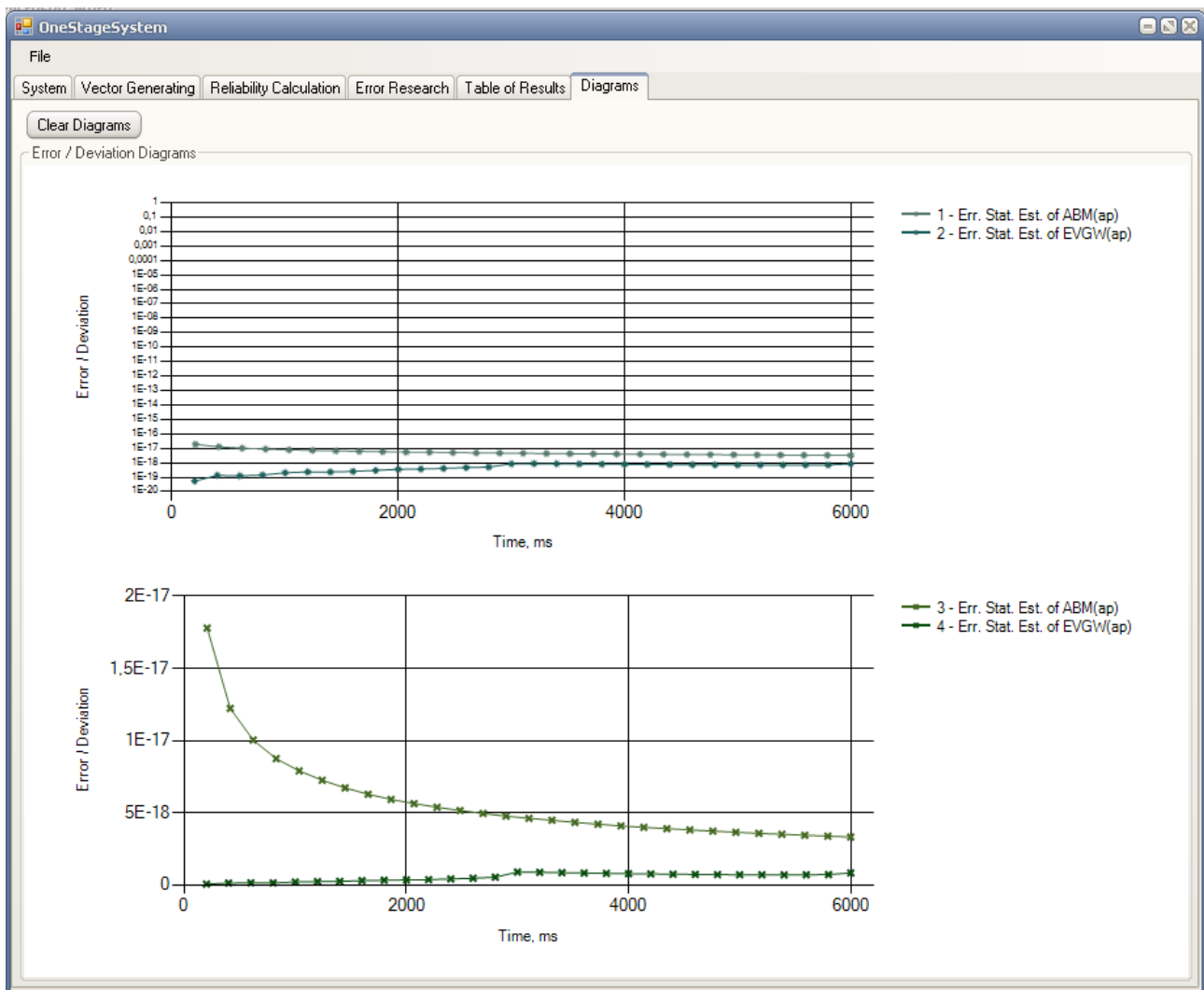


Рис. 5. Графіки статистичних оцінок похибок розрахунку імовірності безвідмовної роботи ВБС, що має 40 процесорів, імовірність відмови яких – $10^{-5} - 10^{-4}$.

Висновки

В роботі дається коротке описання розробленого програмного продукту SERC, в якому реалізовано відомі і запропоновані автором модифікації методу статистичних випробувань для розрахунку показників надійності ВБС та засоби для оцінки похибки такого розрахунку.

Приводяться приклади ВБС, для яких похибка методу статистичних випробувань з генерацією двійкових векторів заданої ваги на 10 % менша, ніж похибка відомого методу прискорення статистичних випробувань.

Для забезпечення можливості проведення статистичних випробувань реалізовано спеціалізовані генератори двійкових векторів, зокрема, безповторний генератор рівномірних двійкових векторів

заданої ваги, генератор двійкових векторів, який управляється одночасно за двома параметрами: імовірність появи та вага вектора.

1. Kuo W., Zuo M.J. Optimal reliability modeling: principles and applications. – John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, USA. – 2003. – 559 p.
2. Zuo M.J., Lin D., Wu Y. Reliability Evaluation of Combined k-out-of-n :F, Consecutive-k-out-of-n:F, and Linear Connected-(r, s)-out-of-(m, n):F System Structures // IEEE Trans. Reliability. – 2000. – Vol. 49. – P. 99–104.
3. Boland P.J., Samaniego F.J. An $O(k^2 \cdot \log(n))$ Algorithm for Computing the Reliability of Consecutive-k-out-of-n: F

- Systems // IEEE Trans. Reliability. – 2004. – Vol. 53. – P. 3–6.
4. Yamamoto H., Zuo M.J., Akiba T., Tian Z. Recursive Formulas for the Reliability of Multi-State Consecutive-k-out-of-n:G Systems // IEEE Trans. Reliability. – 2006. – Vol. 55. – P. 98–104.
 5. Stopjakova V., Malosek P., Matej M., Nagy V., Margala M. Reliability of Two-Stage Weighted-k-out-of-n Systems With Components in Common // IEEE Trans. Reliability. – 2005. – Vol. 54. – P. 431–440.
 6. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
 7. Вероятностные методы в вычислительной технике: учеб. пособие для вузов по спец. ЭВМ / Крайников А.В., Кудриков Б.А., Лебедев А.Н. и др.; под ред. А.Н. Лебедева и Е.А. Черныковского. – М.: Высш. шк., 1986. – 132 с.
 8. Романкевич А.М., Гроль В.В., Карачун Л.Ф. и др. Об одном подходе к расчету надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2002. – № 119. – С. 54–58.
 9. Романкевич А.М., Гроль В.В., Романкевич В.А. и др. Оценка погрешности статистического расчета надежности ОМС, которым соответствуют иерархические GL - модели // Радиоэлектронні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 7. – С. 142–146.
 10. Романкевич А.М., Фесенюк А.П. Об одном методе расчета показателей надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем // УСиМ. – 2011. – № 6. – С.14–18, 37.
 11. Романкевич А.М., Карачун Л.Ф., Романкевич В.А. Графо-логические модели для анализа сложных отказоустойчивых вычислительных систем // Электронное моделирование. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 102–111.
 12. Ushakov I. Is the reliability theory still alive // The 6th International Conference "RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION – 2006". – Session 4. Reliability in Applications. – P. 188–197.
 13. Власов Е.П., Жданов В.В., Корнейчук В.И. и др. Расчет надежности компьютерных систем. – К.: "Корнійчук", 2003. – 187 с.
 14. Романкевич В.О., Майданюк І.В., Фесенюк А.П. та ін. Генерування рівноважних векторів для проведення статистичних експериментів з GL-моделями // Науковий вісник Чернівецького національного університету. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2010. – Т. 1, вип. 2. – С. 28–30.

References

1. Kuo W., Zuo M. J. (2003) Optimal reliability modeling: principles and applications, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc.
2. Zuo M.J., Lin D., Wu Y. (2000) 'Reliability Evaluation of Combined k-out-of-n :F, Consecutive-k-out-of-n:F, and Linear Connected-(r, s)-out-of-(m, n):F System Structures' IEEE Trans. Reliability, vol. 49. – P. 99–104.
3. Boland P. J., Samaniego F. J. (2004) 'An $O(k^2 \cdot \log(n))$ Algorithm for Computing the Reliability of Consecutive-k-out-of-n: F Systems' IEEE Trans. Reliability, vol. 53, P. 3–6.
4. Yamamoto H., Zuo M. J., Akiba T., Tian Z. (2006) 'Recursive Formulas for the Reliability of Multi-State Consecutive-k-out-of-n:G Systems' IEEE Trans. Reliability, vol. 55, P. 98–104.
5. Stopjakova V., Malosek P., Matej M., Nagy V., Margala M. (2005) 'Reliability of Two-Stage Weighted-k-out-of-n Systems With Components in Common' IEEE Trans. Reliability, vol. 54, P. 431–440.
6. Ushakov I.A. (ed.) (1985) Reliability of technical systems: Handbook, Moscow: Radio i svyaz (Russian).
7. Lebedev A.N., Chernyakovskiy E.A. (ed.) (1986) Probabilistic methods in computer science: a textbook for high schools by computers specialty, Moscow: Vysshaya shkola (Russian).
8. Romankevich O.M., Grol V.V., Karachun L.F., Orlova M.M., Romankevich V.O. (2002) 'On an approach of the fault-tolerant multiprocessor systems reliability calculation', Avtomatizirovannyye sistemyi upravleniya i priboryi avtomatiki, vol. 119, P. 54–58 (Russian).

9. Romankevich O.M., Grol V.V., Romankevich V.O., Feseniuk A.P. (2010) 'An error estimation of reliability calculation of fault tolerant multiprocessor systems which correspond to the hierarchical GL – models' Radioelektronni ta kompiuterni systemy, vol. 7, P. 142–146 (Russian).
10. Romankevich O.M., Feseniuk A.P. (2011) 'On a method of the fault-tolerant multiprocessor systems reliability characteristics calculation', Upravlyayuschie sistemy i mashyny, Vol. 6. – P. 14–18 (Russian).
11. Romankevich O.M., Karachun L.F., Romankevich V.O. (2001) 'Graph-logic models for analysis of complex fault tolerant computational systems' Elektronnoe modelirovanie, vol. 23, N 1, P. 102–111 (Russian).
12. Ushakov I. (2006) 'Is the reliability theory still alive' The 6th International Conference "RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION – 2006", Session 4. Reliability in Applications, P. 188–197.
13. Vlasov E.P., Zhdanov V.V., Korneichuk V.I., Oleinik M.V., Podlesskiy S.N. (2003) The reliability calculation of computer systems, Kyiv: Korniiichuk.
14. Romankevich V.O., Maidaniuk I.V., Feseniuk A.P., Shkira D.S. (2010) 'Generating of constant-weight vectors for conducting the statistical experiments'

Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu, Series: Kompiuterni systemy ta komponenty, vol. 1, N 2, P. 28–30 (Ukrainian).

Одержано 10.02.2016

Про автора:

Фесенюк Андрій Петрович,
кандидат технічних наук,
докторант НТУУ «КПІ».
Кількість наукових публікацій в
українських виданнях – 17.
Кількість наукових публікацій в
іноземних індексованих виданнях – 1.
<http://orcid.org/0000-0002-0165-4431>

Місце роботи автора:

Національний технічний університет
України «КПІ»,
03056, м. Київ-56,
проспект Перемоги, 37.
Тел.: +38 068 354 45 01.
E-mail: andrew_fesenyuk@ukr.net