УДК 621.311.25-529-192:004.052.32 **doi: 10.32620/reks.2019.4.02**

О. М. ОДАРУЩЕНКО[1,2], О. Б. ОДАРУЩЕНКО[3], В. С. ХАРЧЕНКО[1]

[1] ***Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "ХАІ", Харків***
[2] ***Науково-виробниче підприємство "Радікс", Кропивницький***
[3] ***Полтавська державна аграрна академія***

МАРКОВСЬКІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА САМОДІАГНОСТОВНИХ ПРОГРАМОВНИХ ПЛАТФОРМАХ З УРАХУВАННЯМ ПОМИЛОК ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ

Забезпечення безпечної експлуатації АЕС залишається однією із найважливіших задач безпеки енергетики та енергетичного комплексу в цілому. В забезпеченні безпеки АЕС важливу роль відіграють інформаційно-керуючі системи (ІКС) та їх складові – програмно-технічні комплекси (ПТК). До таких комплексів висуваються надзвичайно високі вимоги, перш за все, до їх надійності та функціональної безпеки. ***Об'єктом*** *дослідження і аналізу в даній роботі є ПТК ІКС АЕС, зокрема, керуючої системи нормальної експлуатації (СНЕ) та системи аварійного захисту (САЗ), які розроблено з використанням програмовної платформи RadICS.* ***Метою статті*** *є розроблення та аналіз результатів дослідження марковських моделей оцінювання надійності та функціональної безпеки програмно-технічних комплексів (ПТК), які розробляються на основі самодіагностовних програмовних платформ. Розроблено дерева відмов таких платформ і ПТК на їх основі. На наступному етапі розроблено кілька марковських моделей резервованих ПТК. Моделі враховують помилки засобів контролю та діагностування, а саме помилки, пов'язані з невиявленням збоїв і відмов відповідних компонентів ПТК і каналів резервованих структур. Розроблено моделі для різних варіантів резервованих структур з урахуванням застосування принципу диверсності для ІКС САЗ і процесів відновлення, параметрів потоків відмов, обумовлених дефектами проектування. Досліджено також багатофрагментні марковські моделі відновлюваних ПТК для одно- та двохверсійних структур. Проаналізовано результати моделювання для систем при використанні різних пакетів комп'ютерної математики. Сформульовано висновки щодо вибору пакетів та налаштувань при вирішенні систем диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена.* ***Наукова новизна*** *результатів полягає у тому, що запропоновані моделі ураховують розширену множину параметрів самодіагностовних платформ на програмовній логіці, ПТК та ІКС, процесів їх використання та обслуговування. Сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів та варіантів структур для ПТК систем нормальної експлуатації та аварійного захисту.*

Ключові слова*: системи нормальної експлуатації; системи аварійного захисту; дерево відмов; функціональна безпека; функція готовності; багатофрагментна марковська модель.*

Вступ

В теперішній час в світі сталою є тенденція зростання виробництва електричної енергії атомними електростанціями. Тільки за останнє десятиліття ця кількість зросла на 30%. Відповідно, забезпечення безпечної експлуатації АЕС залишається однією із найважливіших задач. В забезпеченні безпеки АЕС важливу роль відіграють інформаційно-керуючими системами (ІКС) та їх складові – програмно-технічні комплекси (ПТК).

Зрозуміло, що до таких комплексів державними та міжнародними стандартами висуваються надзвичайно високі вимоги, зокрема, до їх надійності та функціональної безпеки [1, 2].

Практичне використання цих систем дозволяється тільки після успішного завершення процесів їх ліцензування та сертифікації на відповідність вимогам стандартів [3]. Успішне завершення процесів сертифікації та ліцензування залежить від результатів моделювання функціонування систем вказаного класу [4, 5].

Моделювання дозволяє провести дослідження ПТК, які не можуть бути виконані традиційними методами та визначити їх надійність та функціональну безпеку. Воно істотно знижує терміни та вартість проектування і за рахунок аналізу великої кількості варіантів підвищує ефективність системи, що розроблюється [6-11].

Прикладами таких ПТК є керуюча система нормальної експлуатації (СНЕ) та системи аварійного захисту (САЗ), які працюють на всіх атомних електричних станціях (АЕС) [12, 13]. Під СНЕ розумієм систему, яка здійснює керування технологічними

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

процесами у всіх режимах роботи блоку АЕС з встановленими в проекті показниками якості, надійності і метрологічними характеристиками. Під САЗ розуміємо системи, які забезпечують надійну аварійну зупинку реактора і підтримання його в підкритичному стані в будь-яких режимах порушень нормальної експлуатації, проектних аварій. Обов'язковою умовою побудови такої системи є переведення контрольованого процесу в результаті її спрацювання в безпечний стан.

Впродовж реалізації процесів сертифікації та ліцензування є важливим оцінювати властивості багатокомпонентної системи, такі як надійність та пов'язану з нею властивість - функціональну безпеку. Багатокомпонентність визначається наявністю апаратної, програмної та програмовної компонент системи. За умови наявності багатокомпонентності системи, показники якої досліджуються, та множин відповідно дефектів компонент оцінювання має бути комплексним.

Під комплексністю оцінювання розуміємо врахування в ході моделювання множин компонент, дефектів, відмов та множин змінних параметрів. Таке оцінювання базується на використанні марківського аналізу, та за умови врахування зміни значень параметрів, що визначають надійність компонент системи застосовується багатофрагментне марковське моделювання [4].

В якості ПТК, параметри яких оцінюються, обрано ПТК для СНЕ та САЗ виробництва НВП «Радій» м. Кропивницький, Україна, архітектура яких наведена на рис. 2, 5 [12, 13]. В попередніх роботах комплексність оцінювання обмежувалась урахуванням впливу компонент ПТК без урахування помилок засобів контролю та діагностування самодаігностовних програмовних платформ.

Метою цієї статті є опис підходу та розроблення моделей для комплексного оцінювання надійності та функціональної безпеки ПТК, які будуються із використанням самодаігностовних програмовних платформ з урахуванням помилок засобів контролю та діагностування.

1. Моделі оцінювання надійності та функціональної безпеки ПТК

Першим етапом побудови моделей є розробка дерева відмов (ДВ), де ДВ є діаграмою, яка відображає відмови компонент системи, події або їх комбінації, що призводять до зміни стану системи.

Кожна вершина ДВ відповідає конкретному стану системи. Причому кожна система може знаходитись в одному з п'яти станів, а саме:

- 3 – система справна;
- 2 – система працездатна, відмовив канал (система несправна), відмова виявлена і канал відновлюється;
- 1 – система непрацездатна, відмовили два канали, відмови виявлені і канал відновлюється;
- 2_F – система працездатна, відмовив канал (система несправна), відмова не виявлена і канал не відновлюється;
- 1_F – система непрацездатна, відмовили два канали, виявлена відмова одного каналу і канал відновлюється, відмова іншого каналу не виявлена і канал не відновлюється.

ДВ відображає переходи із одного вузла в інший, тому на його основі будують БММ. *БММ* – це представлення ланок марковського ланцюга у вигляді сукупності фрагментів, що повторюються і відрізняються одним або декількома параметрами. Для побудови першого фрагменту БММ системи, крім можливості переходів із одного вузла в інший (відмова каналу), також враховуємо можливість повернення (відновлення каналу). Таким чином можна побудувати перший фрагмент. З'єднуючою ланкою між фрагментами моделі є стани, коли відмовляє програмне забезпечення.

В БММ застосовуються наступні параметри:

- $\lambda_p = 10^{-4}$1/г – інтенсивність відмов апаратного забезпечення;
- $\lambda_d = 5 \cdot 10^{-5}$1/г – інтенсивність відмов, обумовлених проявом дефектів програмного забезпечення;
- $\mu_p = 1$ – інтенсивність відновлення апаратного забезпечення;
- $\mu_d = 0{,}01$ – інтенсивність відновлення програмного забезпечення;
- $D = 0{,}95$ і $D = 0{,}99$ – параметр достовірності контролю і діагностики.

Далі відповідно до БММ складаємо СДР КЧ.

СНЕ, що розглядається, має архітектуру 2оо3.

Архітектура – це ряд спеціальних проектних рішень, які дозволяють наділити систему набором якостей, що збільшують її надійність.

Дана архітектура складається з трьох каналів, з'єднаних паралельно з мажоритуванням вихідних сигналів так, що вірним вихідним станом вважається той, що є однаковим для будь-якої пари каналів.

Передбачається, що будь-яке діагностичне тестування тільки фіксує знайдені збої або відмови і не може змінити ні вихідні стани каналів, ні результат. Структурна схема надійності архітектури 2оо3, представлена на рис. 1.

Структура СНЕ, якій відповідає архітектура 2оо3, представлена на рис. 2.

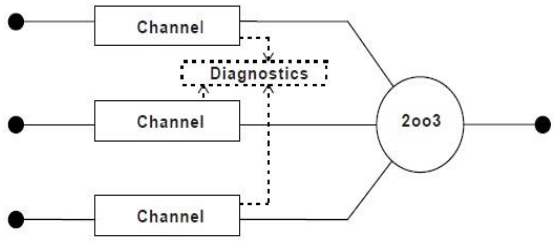

Рис. 1. Структурна схема архітектури 2oo3

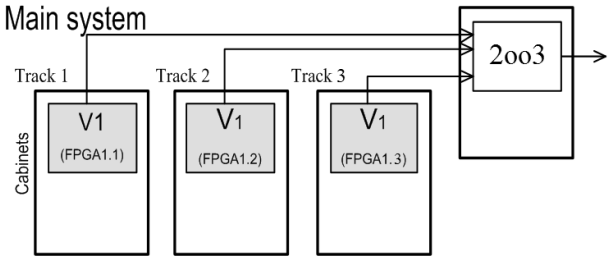

Рис. 2. Структура СНЕ

Враховуючи кількість станів і опис вузлів ДВ, визначаємо можливість переходу із одного вузла дерева до іншого. Якщо цей перехід неможливий, то ребро відсутнє, тобто відсутні перехідні ймовірності. Завдання ДВ – показати можливість переходу між вузлами дерева. Побудова ДВ (рис. 3) є попереднім етапом для переходу до марковського багатофрагментного моделювання.

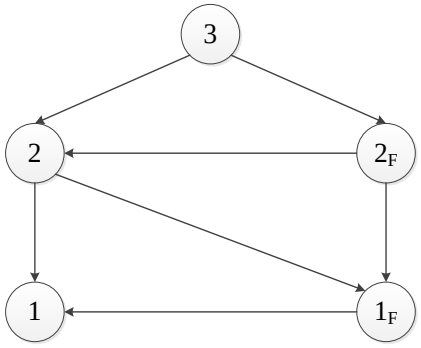

Рис. 3. ДВ СНЕ

Кожна вершина ДВ відповідає конкретному стану системи. Перелік станів наступний:

- 3 – система справна;
- 2 – система працездатна, відмовив один канал (система несправна), відмова виявлена і канал відновлюється;
- 1 – система непрацездатна, відмовили два канали, відмови виявлені і канал відновлюється;
- 2_F – система працездатна, відмовив канал (система несправна), відмова не виявлена і канал не відновлюється ;
- 1_F – система непрацездатна, відмовили два канали, виявлена відмова одного каналу і канал відновлюється, відмова іншого каналу не виявлена і канал не відновлюється.

Умовно стани 1_F, 2_F можливо віднести до небезпечних станів, за умови рівня відповідальности системи в цілому.

Спираючись на розроблене ДВ, будується багатофрагментна марковська модель (БММ) і зокрема її перший фрагмент, де БММ – це представлення ланок марковського ланцюга у вигляді сукупності фрагментів, що повторюються і відрізняються одним або декількома параметрами (рис. 4). З'єднуючою ланкою між фрагментами моделі є стани, коли відмовляє програмне забезпечення (стани S_5, S_6, S_7).

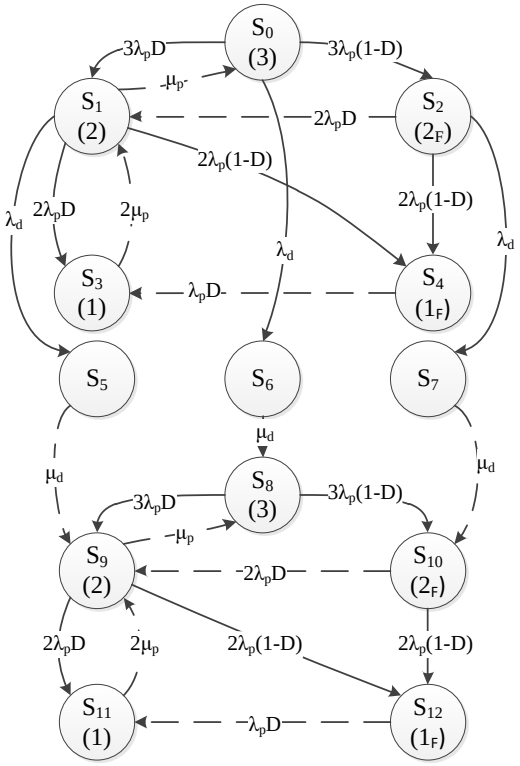

Рис. 4. Багатофрагментна марковська модель надійності СНЕ (БММ СНЕ)

Використовуючи ДВ і марковське моделювання, був побудований перший фрагмент БММ СНЕ. Суцільною лінією позначені ребра, що визначають перехід за умови прояву відповідного типу дефекту (апаратного або програмного) і показує відмови, а штрихова лінія – відновлення каналу СНЕ.

В БММ застосовуються наступні параметри:

- $\lambda_p = 10^{-4}$ – інтенсивність відмов апаратного забезпечення;
- $\lambda_d = 5 \cdot 10^{-5}$ – інтенсивність відмов програмного забезпечення;

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

– $\mu_p = 1$ – інтенсивність відновлення апаратного забезпечення;

– $\mu_d = 0{,}01$ – інтенсивність відновлення програмного забезпечення;

– $D = 0{,}95$ і $D = 0{,}99$ – параметр достовірності контролю і діагностики.

Вершини БММ СНЕ відповідають *функціональним станам СНЕ*.

Всього їх 13, і вони розподіляються на три категорії:

1) функціональні стани, при яких система справна ($S_0(3)$, $S_8(3)$);

2) функціональні стани, при яких система працездатна ($S_1(2)$, $S_2(2_F)$, $S_9(2)$, $S_{10}(2_F)$);

3) функціональні стани, при яких система непрацездатна ($S_3(1)$, $S_4(1_F)$, $S_5(2)$, $S_6(3)$, $S_7(2_F)$, $S_{11}(1)$, $S_{12}(1_F)$).

Відповідно до рис. 4, були описані *функціональні стани СНЕ*:

$S_0(3)$ – система справна, працюють 3 канали;

$S_1(2)$ – система працездатна, відмовив 1 канал, відмова виявлена і канал відновлюється;

$S_2(2_F)$ – система працездатна, відмовив 1 канал, відмова не виявлена і канал не відновлюється;

$S_3(1)$ – система непрацездатна, відмовили 2 канали, відмови виявлені і канал відновлюється;

$S_4(1_F)$ – система непрацездатна, відмовили 2 канали, відмова одного каналу виявлена і канал відновлюється, відмова іншого каналу не виявлена і канал не відновлюється;

$S_5(2)$ – система непрацездатна, при виявленій відмові одного каналу відмовила програмна частина системи, відмова виявлена і програмна частина відновлюється;

$S_6(3)$ – система непрацездатна, при роботі трьох каналів відмовила програмна частина системи, відмова виявлена і програмна частина відновлюється;

$S_7(2_F)$ – система непрацездатна, при невиявленій відмові одного каналу відмовила програмна частина системи, відмова виявлена і програмна частина відновлюється;

$S_8(3)$ – система справна, після відновлення програмної частини системи працюють 3 канали;

$S_9(2)$ – система працездатна, після відновлення програмної частини відмовив 1 канал, відмова виявлена і канал відновлюється;

$S_{10}(2_F)$ – система працездатна, після відновлення програмної частини відмовив 1 канал, відмова не виявлена і канал не відновлюється;

$S_{11}(1)$ – система непрацездатна, відмовили 2 канали, відмови виявлені і канал відновлюється;

$S_{12}(1_F)$ – система непрацездатна, відмовили 2 канали, відмова одного каналу виявлена і канал відновлюється, відмова іншого каналу не виявлена і канал не відновлюється.

Далі відповідно до БММ складено систему диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена (СДР КЧ).

Всі розрахунки проводяться на проміжку часу $t \in [0; 10000]$ із точністю $e = 10^{-6}$.

Після спрощення та зведення подібних доданків одержано СДР КЧ для БММ СНЕ:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -(3\lambda_p + \lambda_d)P_0(t) + \mu_p P_1(t), \\ P_1'(t) = -(\mu_p + 2\lambda_p + \lambda_d)P_1(t) + 3\lambda_p D P_0(t) + 2\lambda_p D P_2(t) + 2\mu_p P_3(t), \\ P_2'(t) = -(2\lambda_p + \lambda_d)P_2(t) + 3\lambda_p(1-D)P_0(t), \\ P_3'(t) = -2\mu_p P_3(t) + 2\lambda_p D P_1(t) + \lambda_p D P_4(t), \\ P_4'(t) = -\lambda_p D P_4(t) + 2\lambda_p(1-D)P_1(t) + 2\lambda_p(1-D)P_2(t), \\ P_5'(t) = -\mu_d P_5(t) + \lambda_d P_1(t), \\ P_6'(t) = -\mu_d P_6(t) + \lambda_d P_0(t), \\ P_7'(t) = -\mu_d P_7(t) + \lambda_d P_2(t), \\ P_8'(t) = -3\lambda_p P_8(t) + \mu_d P_6(t) + \mu_p P_9(t), \\ P_9'(t) = -(\mu_p + 2\lambda_p)P_9(t) + 3\lambda_p D P_8(t) + 2\lambda_p D P_{10}(t) + 2\mu_p P_{11}(t) + \mu_d P_5(t), \\ P_{10}'(t) = -2\lambda_p P_{10}(t) + \mu_d P_7(t) + 3\lambda_p(1-D)P_8(t), \\ P_{11}'(t) = -2\mu_p P_{11}(t) + 2\lambda_p D P_9(t) + \lambda_p D P_{12}(t), \\ P_{12}'(t) = -\lambda_p D P_{12}(t) + 2\lambda_p(1-D)P_9(t) + 2\lambda_p(1-D)P_{10}(t), \\ \sum_{i=0}^{12} P_i(t) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Система аварійного захисту (САЗ) має двухкаскадну схему голосування (перший каскад 2/3, другий 1/2).

Така схема є комбінацію двох підсистем з мажоритарною структурою (рис. 5), побудованих по принципу MooN.

Це означає, що для виконання функцій повинні працювати хоча б M каналів із N. Додатково, з метою парирування прояву однотипних дефектів ПЗ, задіяно принцип диверсності, який в данному випадку реалізовано диверсними програмними версіями у підсистемах (V_1,V_2).

ДВ САЗ наведено на рис. 6.

БММ САЗ, яка побудована з врахуванням помилок засобів контролю і діагностування, зображена на рис.7.

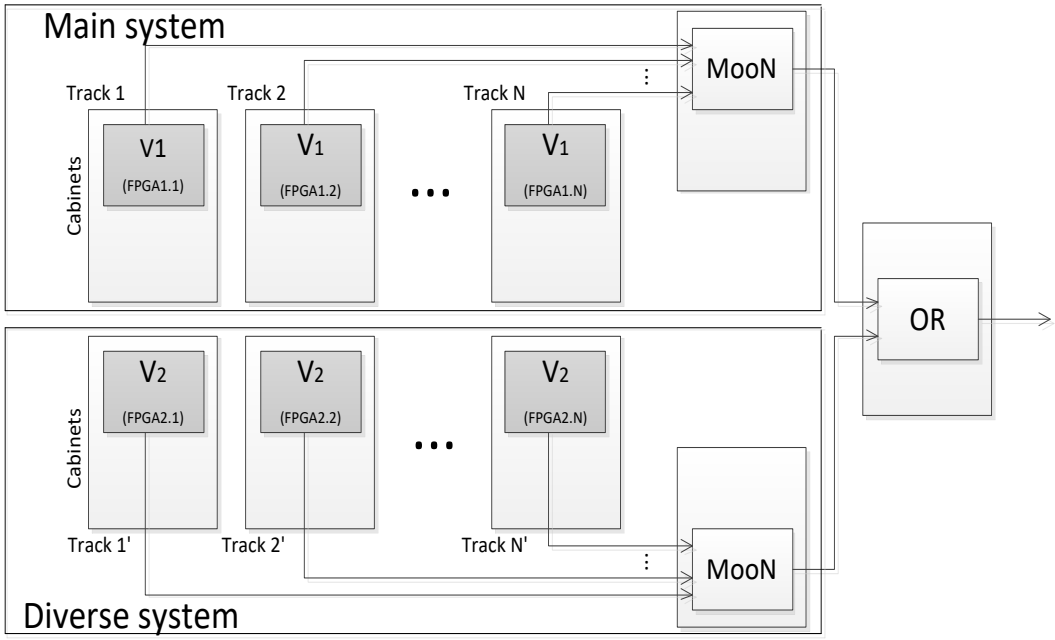

Рис. 5. Структура САЗ

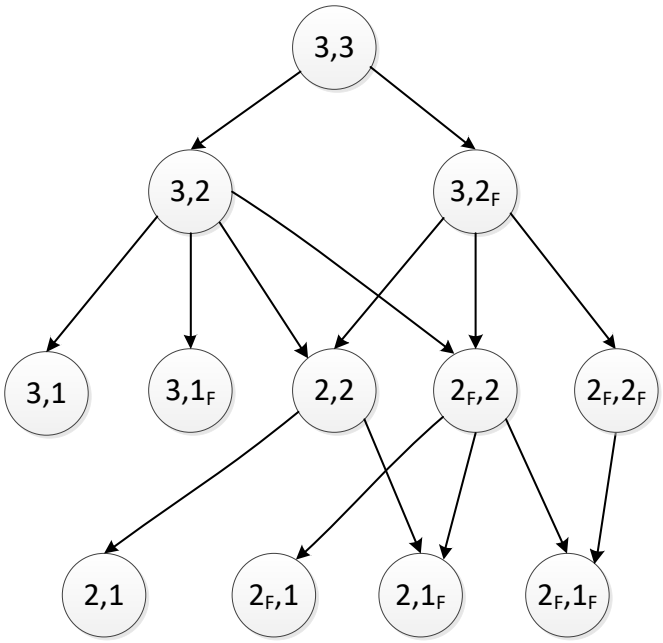

Рис. 6. Дерево відмов САЗ

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

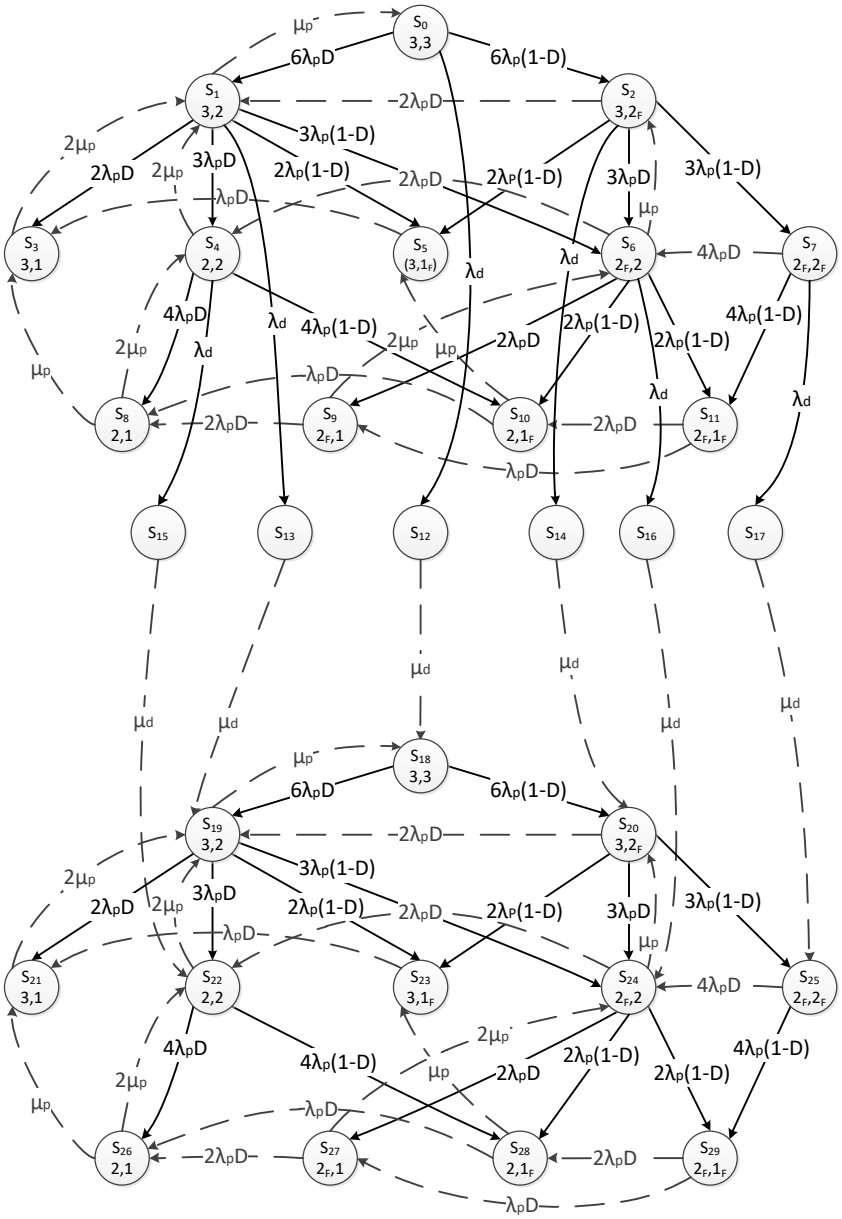

Рис. 7. Багатофрагментна марковська модель САЗ

Вершини БММ САЗ відповідають функціональним станам САЗ. Всього їх 30, і вони розподіляються на три категорії:

4) функціональні стани, при яких система *справна* (S_0 (3,3), S_{18} (3,3));

5) функціональні стани, при яких система *працездатна* (S_1 (3,2), S_2 (3,2_F), S_4 (2,2), S_6 (2_F,2), S_7 (2_F,2_F), S_{19} (3,2), S_{20} (3,2_F), S_{22} (2,2), S_{24} (2_F,2), S_{25} (2_F,2_F));

6) функціональні стани, при яких система *непрацездатна* (S_3 (3,1), S_5 (3,1_F), S_8 (2,1), S_9 (2_F,1), S_{10} (2,1_F), S_{11} (2_F,1_F), S_{12} (3,3), S_{13} (3,2), S_{14} (3,2_F), S_{15} (2,2), S_{16} (2_F,2), S_{17} (2_F,2_F), S_{21} (3,1), S_{23} (3,1_F), S_{26} (2,1), S_{27} (2_F,1), S_{28} (2,1_F), S_{29} (2_F,1_F)).

Розглянемо всі функціональні стани САЗ:

S_0 (3,3) – обидві підсистеми (основна і резервна) справні;

S_1 (3,2) – обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова виявлена (канал відновлюється);

S_2 (3,2_F) – обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова не виявлена (канал не відновлюється);

S_3 (3,1) – одна підсистема справна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), відмови виявлені (канали відновлюються);

S_4 (2,2) – обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови виявлені (канали відновлюються);

S_5 (3,1_F) – одна підсистема справна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна),

виявлена відмова одного каналу (канал відновлюється), відмова другого каналу не виявлена;

S_6 (2_F,2) – обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмова виявлена тільки в одному (канал з виявленою відмовою відновлюється);

S_7 (2_F,2_F) – обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови не виявлені (канали не відновлюються);

S_8 (2,1) – одна підсистема працездатна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), всі відмови виявлені (канали відновлюються);

S_9 (2_F,1) – одна підсистема працездатна, відмова не виявлена (канал не відновлюється), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), їх відмови виявлені (і канали відновлюються);

S_{10} (2,1_F) – одна підсистема працездатна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), одна з відмов не виявлена (по одному каналу в кожній підсистемі відновлюються);

S_{11} (2_F,1_F) – одна підсистема працездатна, відмовив один канал, відмова не виявлена (канал не відновлюється), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), виявлена відмова одного каналу (канал відновлюється), відмова другого каналу невиявлена;

S_{12} (3,3) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми (основна і резервна) справні;

S_{13} (3,2) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова виявлена;

S_{14} (3,2_F) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова не виявлена;

S_{15} (2,2) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови виявлені;

S_{16} (2_F,2) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмова виявлена тільки в одному;

S_{17} (2_F,2_F) – система непрацездатна, відмовила програмна частина, відмова виявлена і програмна частина відновлюється, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови не виявлені;

S_{18} (3,3) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми (основна і резервна) справні;

S_{19} (3,2) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова виявлена (канал відновлюється);

S_{20} (3,2_F) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми працездатні (одна справна), у другій підсистемі відмовив канал (підсистема несправна), відмова не виявлена (канал не відновлюється);

S_{21} (3,1) – одна підсистема справна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), відмови виявлені (канали відновлюються);

S_{22} (2,2) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови виявлені (канали відновлюються);

S_{23} (3,1_F) – одна підсистема справна, у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), виявлена відмова одного каналу (канал відновлюється), відмова другого каналу не виявлена;

S_{24} (2_F,2) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмова виявлена тільки в одному (канал з виявленою відмовою відновлюється);

S_{25} (2_F,2_F) – програмна частина відновлена, обидві підсистеми працездатні (обидві несправні), в обох підсистемах відмовили по одному каналу, відмови не виявлені (канали не відновлюються);

S_{26} (2,1) – одна підсистема працездатна (і несправна), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), всі відмови виявлені (канали відновлюються);

S_{27} (2_F,1) – одна підсистема працездатна (і несправна), відмова не виявлена (канал не відновлюється), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), їх відмови виявлені (і канали відновлюються);

S_{28} (2,1_F) – одна підсистема працездатна (і несправна), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), одна з відмов не виявлена (по одному каналу в кожній підсистемі відновлюються);

S_{29} (2_F,1_F) – одна підсистема працездатна (і несправна), відмовив один канал, відмова не виявлена (канал не відновлюється), у другій відмовили два канали (підсистема непрацездатна), виявлена відмова одного каналу (канал відновлюється), відмова другого каналу невиявлена.

На основі складеної БММ САЗ була побудована СДР КЧ, яка після спрощення має вигляд (2):

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

$$
\begin{cases}
P_0'(t) = -(6\lambda_p + \lambda_d)P_0(t) + \mu_p P_1(t),\\
P_1'(t) = 6\lambda_p D P_0(t) - (\mu_p + 5\lambda_p + \lambda_d)P_1(t) + 2\lambda_p D P_2(t) + 2\mu_p P_3(t) + 2\mu_p P_4(t),\\
P_2'(t) = 6\lambda_p(1-D)P_0(t) - (5\lambda_p + \lambda_d)P_2(t) + \mu_p P_6(t),\\
P_3'(t) = 2\lambda_p D P_1(t) - 2\mu_p P_3(t) + \lambda_p D P_5(t) + \mu_p P_8(t),\\
P_4'(t) = 3\lambda_p D P_1(t) - (2\mu_p + 4\lambda_p + \lambda_d)P_4(t) + 2\lambda_p D P_6(t) + 2\mu_p P_8(t),\\
P_5'(t) = 2\lambda_p(1-D)P_1(t) + 2\lambda_p(1-D)P_2(t) - \lambda_p D P_5(t) + \mu_p P_{10}(t),\\
P_6'(t) = 3\lambda_p(1-D)P_1(t) + 3\lambda_p D P_2(t) - (4\lambda_p + \mu_p + \lambda_d)P_6(t) + 4\lambda_p D P_7(t) + 2\mu_p P_9(t),\\
P_7'(t) = 3\lambda_p(1-D)P_2(t) - (4\lambda_p + \lambda_d)P_7(t),\\
P_8'(t) = 4\lambda_p D P_4(t) - 3\mu_p P_8(t) + 2\lambda_p D P_9(t) + \lambda_p D P_{10}(t),\\
P_9'(t) = 2\lambda_p D P_6(t) - 2(\lambda_p D + \mu_p)P_9(t) + \lambda_p D P_{11}(t),\\
P_{10}'(t) = 4\lambda_p(1-D)P_4(t) + 2\lambda_p(1-D)P_6(t) - (\lambda_p D + \mu_p)P_{10}(t) + 2\lambda_p D P_{11}(t),\\
P_{11}'(t) = 2\lambda_p(1-D)P_6(t) + 4\lambda_p(1-D)P_7(t) - 3\lambda_p D P_{11}(t),\\
P_{12}'(t) = -\mu_d P_{12}(t) + \lambda_d P_0(t),\\
P_{13}'(t) = -\mu_d P_{13}(t) + \lambda_d P_1(t),\\
P_{14}'(t) = -\mu_d P_{14}(t) + \lambda_d P_2(t),\\
P_{15}'(t) = -\mu_d P_{15}(t) + \lambda_d P_4(t),\\
P_{16}'(t) = -\mu_d P_{16}(t) + \lambda_d P_6(t),\\
P_{17}'(t) = -\mu_d P_{17}(t) + \lambda_d P_7(t),\\
P_{18}'(t) = \mu_d P_{12}(t) - 6\lambda_p P_{18}(t) + \mu_p P_{19}(t),\\
P_{19}'(t) = \mu_d P_{13}(t) + 6\lambda_p D P_{18}(t) - (\mu_p + 5\lambda_p)P_{19}(t) + 2\lambda_p D P_{20}(t) + 2\mu_p P_{21}(t) + 2\mu_p P_{22}(t),\\
P_{20}'(t) = \mu_d P_{14}(t) + 6\lambda_p(1-D)P_{18}(t) - 5\lambda_p P_{20}(t) + \mu_p P_{24}(t),\\
P_{21}'(t) = 2\lambda_p D P_{19}(t) - 2\mu_p P_{21}(t) + \lambda_p D P_{23}(t) + \mu_p P_{26}(t),\\
P_{22}'(t) = \mu_d P_{15}(t) + 3\lambda_p D P_{19}(t) - (2\mu_p + 4\lambda_p)P_{22}(t) + 2\lambda_p D P_{24}(t) + 2\mu_p P_{26}(t),\\
P_{23}'(t) = 2\lambda_p(1-D)P_{19}(t) + 2\lambda_p(1-D)P_{20}(t) - \lambda_p D P_{23}(t) + \mu_p P_{28}(t),\\
P_{24}'(t) = \mu_d P_{16}(t) + 3\lambda_p(1-D)P_{19}(t) + 3\lambda_p D P_{20}(t) - (4\lambda_p + \mu_p)P_{24}(t) + 4\lambda_p D P_{25}(t) + 2\mu_p P_{27}(t),\\
P_{25}'(t) = \mu_d P_{17}(t) + 3\lambda_p(1-D)P_{20}(t) - 4\lambda_p P_{25}(t),\\
P_{26}'(t) = 4\lambda_p D P_{22}(t) - 3\mu_p P_{26}(t) + 2\lambda_p D P_{27}(t) + \lambda_p D P_{28}(t),\\
P_{27}'(t) = 2\lambda_p D P_{24}(t) - (2\lambda_p D + 2\mu_p)P_{27}(t) + \lambda_p D P_{29}(t),\\
P_{28}'(t) = 4\lambda_p(1-D)P_{22}(t) + 2\lambda_p(1-D)P_{24}(t) - (\lambda_p D + \mu_p)P_{28}(t) + 2\lambda_p D P_{29}(t),\\
P_{29}'(t) = 2\lambda_p(1-D)P_{24}(t) + 4\lambda_p(1-D)P_{25}(t) - 3\lambda_p D P_{29}(t),\\
\sum_{i=0}^{29} P_i(t) = 1.
\end{cases}
\tag{2}
$$

2. Дослідження надійності та функціональної безпеки ПТК СНЕ та САЗ

Жорсткість є однією з базових проблем, що виникають у процесі проведення чисельного аналізу моделі. Коефіцієнт жорсткості (КЖ) s(x) СДР є базовою метрикою властивості жорсткості. КЖ дозволить автоматично виявити жорсткість СДР, що досліджується, а також визначити ступінь цієї властивості. Для визначення КЖ був використаний найвідоміший підхід - визначення різниці між власними числами матриці Якобі (3), (4).

$$\operatorname{Re}\lambda_i < 0, i = 1,2,\dots,n, \tag{3}$$

$$s(x) = \frac{\max\limits_{i=1,n} \operatorname{Re}(|-\lambda_i|)}{\min\limits_{i=1,n} \operatorname{Re}(|-\lambda_i|)} \gg 1, \tag{4}$$

де λ_i – власні числа матриці Якобі, що розраховані на випадковому частинному розв'язку.

Кількісні значення КЖ (ступінь жорсткості) можуть бути розділені на три групи:

1) $s(x) \le 10^2$ – низька (мала) жорсткість;
2) $10^2 < s(x) < 10^4$– середня жорсткість;
3) $s(x) \ge 10^4$– висока жорсткість [9].

Для дослідження БММ були обрані такі методи розв'язання: вбудований метод Рунге-Кутта 4-го порядку (класичний метод Рунге-Кутта) та модифікований експоненціальний метод (реалізований в програмному продукті комерційної розробки EXPMETH.EXE).

Для визначення рівня функціональної безпеки (ФБ) дуже зручно використовувати ФГ. ФГ – це сума ймовірностей перебування системи в працездатних станах, що обраховується за наступною формулою (5)

$$A(t) = \sum_{i=0}^{n} P_i(t), \quad (5)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність знаходження системи в працездатних станах [10].

Працездатні стани заданої СНЕ – S_0, S_1, S_2, S_8, S_9, S_{10}. Графіки ФГ наведені на рис. 8.

Аналіз результатів моделювання дозволяє відзначити такі особливості. Найбільш «сприятливою» при обрахунку обома методами є модель із параметром достовірності контролю та діагностування $D = 0{,}99$.

При параметрі достовірності контролю і діагностування $D = 0{,}95$ на проміжку $[0;500)$ відзначається різкий спад ФГ системи, а на проміжку $[500; 10000]$ – спостерігається поступовий спад ФГ.

При параметрі достовірності контролю і діагностування $D = 0{,}99$ спостерігається наступне: на проміжку часу $[0;1000)$ відзначається різкий спад ФГ системи, а на проміжку $[1000; 10000]$ – спостерігається поступове зростання ФГ системи.

Аналіз графіків дозволяє зробити висновок, що модель із параметром достовірності контролю і діагностики $D = 0{,}99$ може забезпечити більш високий рівень готовності СНЕ.

Також були досліджені відмінності у чисельних значеннях ФГ СНЕ для різних реалізацій. Їх відображено в табл. 1. Введемо позначення:

– 1 – метод Рунге-Кутта, реалізований в пакеті комп'ютерної математики (ПКМ) Mathematica;

– 2 – модифікований експоненціальний метод, реалізований без ПКМ.

Таблиця 1

Різниця в обчисленнях ФГ СНЕ

	Методи, що порівнюються	
Показники порівняння	1 & 2 D=0,95	1 & 2 D=0,99
Мінімальне значення різниці	0,00	0,00
Максимальне значення різниці	1,00E-06	4,82E-03

Робимо висновок, що результати обчислень «1 & 2 D=0,95» збігаються з точністю $e = 10^{-5}$, «1 & 2 D=0,99» – з точністю $e = 10^{-2}$.

У випадку САЗ працездатних станів буде 12, а саме: S_0 (3,3), S_{18} (3,3), S_1 (3,2), S_2 (3,2_F), S_4 (2,2), S_6 (2_F,2), S_7 (2_F,2_F), S_{19} (3,2), S_{20} (3,2_F), S_{22} (2,2), S_{24} (2_F,2), S_{25} (2_F,2_F).

Графіки ФГ для $D_1 = 0{,}95$ (рис. 9) і $D_2 = 0{,}99$ (рис. 10).

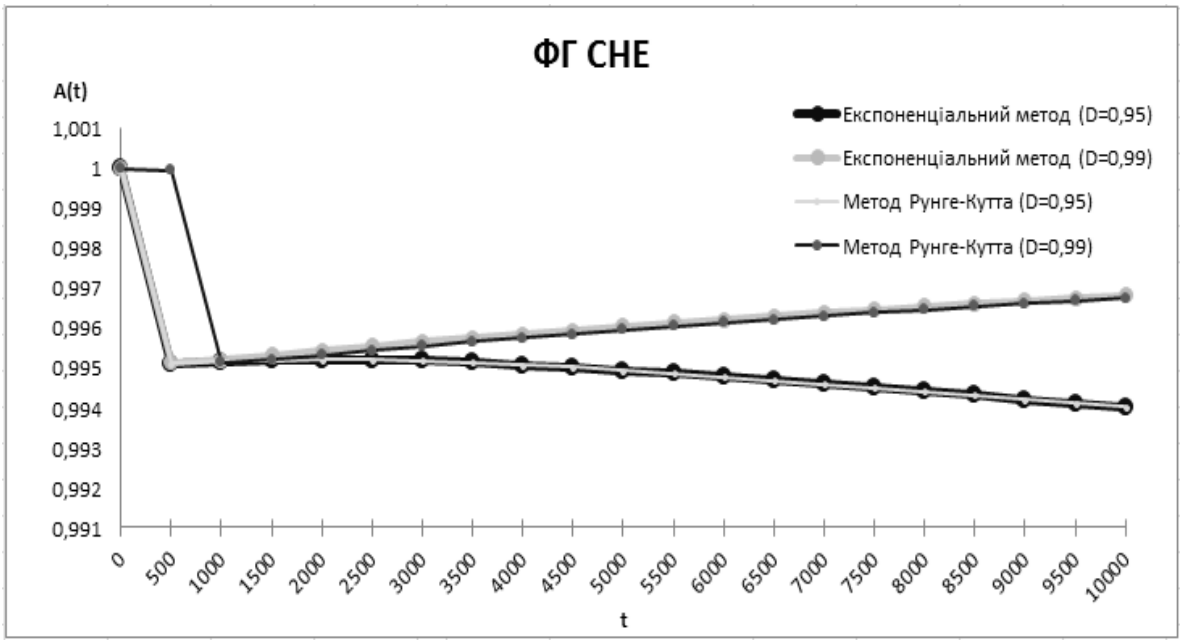

Рис. 8. ФГ СНЕ для $D_1 = 0{,}95$ та $D_2 = 0{,}99$

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

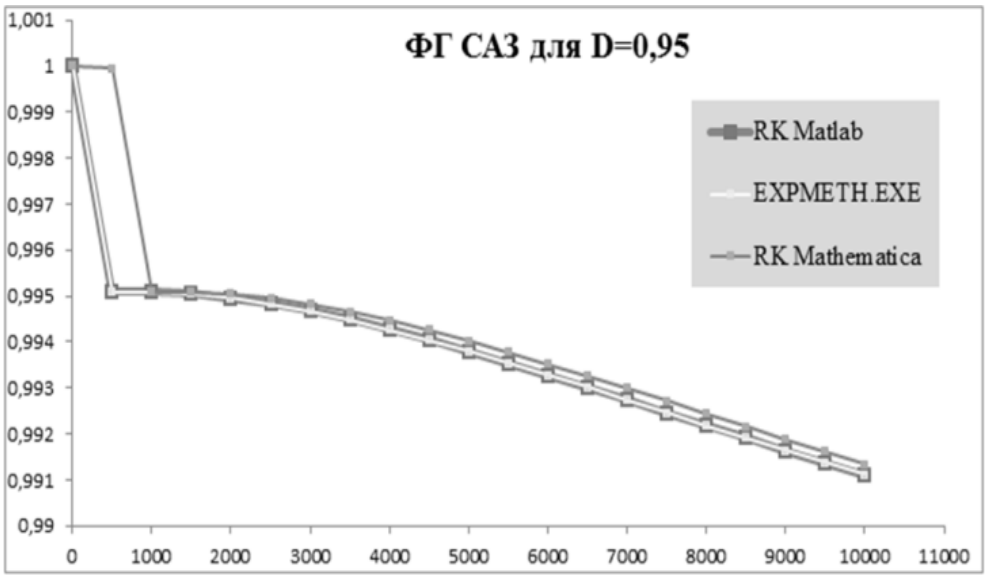

Рис. 9. ФГ САЗ для $D_1 = 0{,}95$

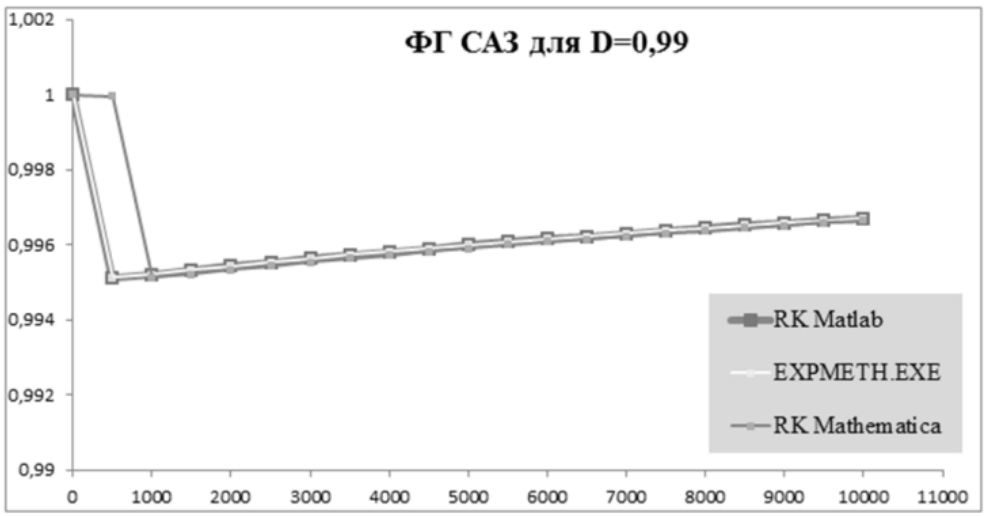

Рис. 10. ФГ САЗ для $D_2 = 0{,}99$

Введемо позначення:

- 1 – метод Рунге-Кутта, реалізований в ПКМ MATLAB;
- 2 – модифікований експоненціальний метод, реалізований в EXPMETH.EXE;
- 3 – метод Рунге-Кутта, реалізований в ПКМ MATHEMATICA.

Відмінності у чисельних значеннях ФГ САЗ для різних реалізацій відображені у таблицях 2-3.

Робимо висновок, що похибки результатів обчислень в обох випадках ідентичні, а саме: «1 & 2» збігаються з точністю $e = 10^{-5}$ до 5-го знака включно, «1 & 3» – з точністю $e = 10^{-2}$ до 2-го знака включно, «2 & 3» – з точністю $e = 10^{-2}$ до 2-го знака включно.

Таблиця 2

Різниця у розразунках ФГ САЗ, $D_1 = 0{,}95$

	1 & 2	1 & 3	2 & 3
Мінімальна різниця	4,70E-09	1,30E-05	1,30E-05
Максимальна різниця	1,63E-06	4,85E-03	4,86E-03

Таблиця 3

Різниця у розразунках ФГ САЗ, $D_1 = 0{,}99$

	1 & 2	1 & 3	2 & 3
Мінімальна різниця	1,17E-08	7,00E-05	7,10E-05
Максимальна різниця	1,74E-06	4,82E-03	4,82E-03

Отже, результати, отримані явним методом Рунге-Кутта 4-го порядку та модифікованим експоненціальним методом майже ідентичні.

Проаналізувавши графіки ФГ САЗ для обох випадків, можемо зробити такі висновки:

1) у першому випадку ФГ на інтервалі часу $t \in [0; 1000)$ різко спадає від 1 до 0,9951, а потім при $t \in [1000; 10000]$ плавно спадає від 0,9951 до 0,9913;

2) у другому випадку ФГ на інтервалі часу $t \in [0; 1000)$ різко спадає від 1 до 0,9951, а потім при $t \in [1000; 10000]$ плавно зростає від 0,9951 до 0,9965.

Отже, якщо параметр достовірності контролю та діагностики $D_2 = 0{,}99$, то маємо вищий рівень надійності та функціональної безпеки системи.

Висновки

Аналіз отриманих результатів моделювання ПТК СНЕ та САЗ на самодіагностовних, програмовних платформах підтверджує важливість врахування впливу на надійність та функціональну безпеку засобів діагностування та контролю, що дозволяє одержувати більш достовірні оцінки вказаних властивостей. Так з аналізу кривої функції готовності на рис. 8 спостерігається, що при параметрі достовірності контролю і діагностування $D = 0{,}95$ на проміжку часу [0;500] годин відзначається різкий спад ФГ системи, а на проміжку $[500; 10000]$ годин – спостерігається поступовий спад ФГ. При параметрі достовірності контролю і діагностування $D = 0{,}99$ спостерігається наступне: на проміжку часу $[0;1000)$ відзначається різкий спад ФГ системи, а на проміжку $[1000; 10000]$ – спостерігається поступове зростання ФГ системи.

Рівень функціональної безпеки (Safety Integrity Level, SIL) досліджуваних архітектур ПТК, у відповідності до вимог станадарту IEC 61508 та обраних параметрах моделювання можливо оцінити як SIL2 для D=0,95 та SIL3 для D=0,99.

В подальшому планується розробити та дослідити моделі САЗ з урахуванням неідеальної диверсності.

Література

1. IEC 61513. Nuclear power plants – instrumentation and control for systems important for safety – general requirements for systems [Text]. Published. 2011-08-25. – IEC Standards, 2011. – II, 86 p.

2. IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems [Text]. Published. 2010-04. – IEC Standards, 2010. – 594 p.

3. Medoff Michel D., Rainer I. Faller. Functional Safety – An IEC 61508 SIL 3 Compatible Development process [Text] / M. Medoff, R. Faller. – Exida, 2010. – 282 p.

4. Харченко, В. С. Базовые многофрагментные макромодели оценки надежности отказоустойчивых компьютерных систем информационно-управляющих комплексов [Текст]/ В. С. Харченко, О. Н. Одарущенко, Е. Б. Одарущенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 5(17). – С. 62-70.

5. Модели отказов информационно-управляющих систем на основе самодиагностируемых программируемых платформ в системах аварийной защиты реакторов [Текст]/ В. В. Скляр, О. Н. Одарущенко, Ю. Л. Поночовный, Е. Н. Бульба, А. О. Ивасюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 4(74). – С. 19-24.

6. Dependability and security models [Text] / K. S. Trivedi, D. S. Kim, A. Roy and D. Medhi // Design of Reliable Communication Networks, 2009. DRCN 2009. 7th International WS, Washington, DC, 2009. – P. 11-20.

7. Sensitivity analysis of availability of redundancy in computer networks [Text] / R. M. Junior, A. P. Guimaraes, K. M. A. Camboim, P. R. M. Maciel, K. S. Trivedi // In Proc. of the 4th International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service. – 2011. – P. 115-121.

8. Solve stiff differential equations and DAEs – variableorder method – MATLAB ode15s [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html. – 01.10.2019.

9. Zheng, Z. Markov Regenerative Models of WebServers for Their User-Perceived Availability and Bottlenecks [Text] / Z. Zheng // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2017. – P. 1-1. DOI: 10.1109/TDSC.2017.2753803.

10. Hashemian, H. M. Predictive maintenance in nuclear power plants through online monitoring [Text] / H. M. Hashemian // Nuclear and Radiation Safety Journal. – 2013. – No. 4. – P. 42-50.

11. Availability assessment of Computer Systems Described by Stiff Markov Chains: Case Study [Text] / V. Kharchenko, O. Odarushchenko, P. Popov, V. Odarushchenko // CCIS. – Springer, 2013. – Vol. 412. – P. 112 – 135.

12. Безопасность атомных станций: системы управления и защиты ядерных реакторов: [Текст] : моногр. / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская, Г. Джонсон, В. В. Елисеев, А. А. Сиора, В. В. Скляр, Л. И. Спектор, В. С. Харченко ; под ред. М. А. Ястребенецкого. – К. : Основа-Принт, 2011. – 768 с.

13. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы [Текст] : моногр. / М. А. Ястребенецкий, В. Н. Васильченко,

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

С. В. Виноградская, В. М. Гольдрин, Ю. В. Розен, Л. И. Спектор, В. С. Харченко ; под ред. М. А. Ястребенецкого. – К. : Техніка, 2004. – 472 с.

References

1. *IEC 61513. Nuclear power plants – instrumentation and control for systems important for safety – general requirements for systems*. International Electrotechnical Commission, 2011. 86 p.

2. *IEC 61508, Electric / Electronic / Programmable Electronic safety-related systems, parts 1-7*. International Electrotechnical Commission, 2010. 594 p.

3. Medoff, M., Faller, R. *Functional Safety - An IEC 61508 SIL 3 Compliant Development Process*. Exida, 2010. 282 p.

4. Kharchenko, B. C., Odarushchenko, O. N., Odarushchenko, E. B. Bazovie mnohofrahmentnie makromodely otsenky nadezhnosty otkazoustoychyvikh komp'yuternыkh system ynformatsyonno-upravlyayushchykh kompleksov [The Basic Multiple-fragment Markov Model reliability assesment of fault-tolerant computer systems for instrumentation and control systems]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi - Radioelectronic and computer systems*, 2006, no. 5(17), pp. 62-70.

5. Sklyar, V. V., Odarushchenko, O. N., Ponochovnyy, Yu. L., Bulba, E. N., Ivasjuk, A. O. Modely otkazov ynformatsyonno-upravlyayushchykh system na osnove samodyahnostyruemikh prohrammyruemikh platform v systemakh avaryynoy zashchyti reaktorov [Failure modes of information-control systems based self-checking soft platforms protection systems]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi - Radioelectronic and computer systems*, 2015, no. 4(74), pp. 19-24.

6. Trivedi, K. S., Kim, D. S., Roy, A., Medhi, D. Dependability and security models. *Design of Reliable Commu-nication Networks, 2009. DRCN 2009. 7th International WS*, Washington, DC, 2009, pp. 11-20.

7. Junior, R. M., Guimaraes, A. P., Camboim, K. M. A., Maciel, P. R. M., Trivedi, K. S. Sensitivity analysis of availability of redundancy in computer networks. *In Proc. of the 4th International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service*, 2011, pp. 115-121.

8. *Solve stiff differential equations and DAEs – variableorder method – MATLAB ode15s.* Available at: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode15s.html (accessed: 01.10.2019).

9. Zheng Z. Markov Regenerative Models of WebServers for Their User-Perceived Availability and Bottlenecks. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2017, pp. 1-1.
DOI: 10.1109/TDSC.2017.2753803.

10. Hashemian, H. M. Predictive maintenance in nuclear power plants through online monitoring. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2013, no. 4, pp. 42-50.

11. Kharchenko, V., Odarushchenko, O., Popov, P., Odarushchenko, V. Availability assessment of Computer Systems Described by Stiff Markov Chains: Case Study.*CCIS*, vol. 412, Springer, 2013, pp. 112-135.

12. Yastrebenetsky, M. A., Rozen, Yu. V., Vynohradskaya, S. V., Johnson, G., Eliseev, V. V., Siora, A. A., Sklyar, V. V., Spektor, L. Y., Kharchenko, V. S. *Bezopasnost' atomnykh stantsii: sistemy upravleniya i zashchity yadernykh reaktorov* [Safety of nuclear power plants: control and protection systems for nuclear reactors]. Kiev, Osnova-Print Publ., 2011. 768 p.

13. Yastrebenetsky, M. A., Vasylchenko, V. N., Vynohradskaya, S. V., Goldrin, V. M., Rozen, Yu. V., Spektor, L. Y., Kharchenko, V. S. *Bezopasnost' atomnykh stantsii: Informatsionnye i upravlyayushchie sistemy* [Safety of nuclear power plants: Information and control systems]. Kiev, Tekhnika Publ., 2004. 472 p.

Поступила до редакції 12.10.2019, розглянута на редколегії 10.12.2019

МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА САМОДИАГНОСТИРУЕМЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ПЛАТФОРМАХ С УЧЕТОМ ОШИБОК СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

О. Н. Одарущенко, Е. Б. Одарущенко, В. С. Харченко

Обеспечение безопасной эксплуатации АЭС остается одной из важнейших задач безопасности энергетики и энергетического комплекса в целом. В обеспечении безопасности АЭС важную роль играют информационно-управляющие системы (ИУС) и их составляющие - программно-технические комплексы (ПТК). К таким комплексам предъявляются чрезвычайно высокие требования, прежде всего, к их надежности и функциональной безопасности. Объектом исследования и анализа в данной работе является ПТК ИУС АЭС, в частности, управляющая система нормальной эксплуатации (СНЭ) и система аварийной защиты (САЗ), которые разработаны с использованием программируемой платформы RadICS. Целью статьи является разработка и анализ результатов исследования марковской модели оценки надежности и функциональной безопасности программно-технических комплексов (ПТК), которые разрабатываются на основе самодиагностируемых программируемых платформ. Разработано дерево отказов таких платформ и ПТК на их основе. На следующем этапе разработано несколько марковских моделей резервированных ПТК. Модели учитыва-

ют ошибки средств контроля и диагностирования, а именно ошибки, связанные с выявления сбоев и отказов соответствующих компонентов ПТК и каналов резервированных структур. Разработаны модели для различных вариантов резервированных структур с учетом применения принципа диверсности для ИКС САЗ и процессов восстановления, параметров потоков отказов, обусловленных дефектами проектирования. Исследованы также многофрагментные марковские модели возобновляемых ПТК для одно - и двухверсийних структур. Проанализированы результаты моделирования для систем при использовании различных пакетов компьютерной математики. Сформулированы выводы по выбору пакетов и настроек при решении систем дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена. Научная новизна заключается в том, что предложенные модели учитывают расширенное множество параметров самодиагностируемых платформ на программируемых логике, ПТК и ИКС, процессов их использования и обслуживания. Сформулированы рекомендации по выбору параметров и вариантов структур для ПТК систем нормальной эксплуатации и аварийной защиты.

Ключевые слова: системы нормальной эксплуатации; системы аварийной защиты; дерево отказов; функциональная безопасность; функция готовности; многофрагментная марковская модель.

MARKOV MODELS FOR FUNCTIONAL SAFETY ASSESSMENT OF INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS BASED ON SELF-CHECKING PROGRAMMABLE PLATFORMS

O. M. Odarushchenko, O. B. Odarushchenko, V. S. Kharchenko

Ensuring the safe operation of nuclear power plants remains one of the most important tasks. An important role in ensuring the safety of nuclear power plants is played by instrumentation and control systems (ICS). Extremely high demands are made on such systems, first of all, on their reliability and functional safety. The object of research and analysis in this work is the Nuclear Island I&C Instrumentation System and Reactor Protection System, which are developed based on programmable RadICS Platform with self-diagnostic. The failure trees of such platforms and ICS based on them were developed. In the next stage, several Markov models of redundant ICS are developed. The article aims to develop and analyze the results of research on Markov models for reliability and safety assessment of ICS based on self-checking programmable platforms. The models take into account errors of checking and diagnostic tools, namely errors associated with identifying failures and failures of the corresponding components of the hardware and software/FPGA and channels of redundant structures. Models have been developed for various options of redundant structures and taking into account the diversity principle for ISC structure and failure rate caused by design defects. Multiple-fragment Markov Models of ICS were also investigated. The scientific novelty lies in the fact that the proposed models take into account an expanded set of parameters of self-diagnosing programmable platforms, ICS, the processes of their use and maintenance. Recommendations on the selection of parameters and structural ICS are formulated.

Keywords: Information and Control System; Reactor Protection System; Fault Tree; Functional Safety; Availability Function; Multiple-fragment Markov Model.

Одарущенко Олег Миколайович – канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник, Науково-виробниче підприємство «Радікс», Кропивницький, Україна, докторант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Одарущенко Олена Борисівна – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Полтавської державної аграрної академії, Полтава, Україна.

Харченко Вячеслав Сергійович – д-р техн. наук, професор, заслужений винахідник України, зав. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Odarushchenko Oleg - Dr., Lead Researcher RPC Radics LLC, Kropyvnytskyi, Ukraine, Doctorate in Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity National aerospace university "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.odarushchenko@radics.tech, ORCID Author ID:0000-0003-3933-9637, Scopus Author ID: 56026080100.

Odarushchenko Elena – Dr, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technology Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine, e-mail: elena.odarushchenko@gmail.com,
ORCID Author ID: 0000-0002-2293-2576, Scopus Author ID: 56560220900.

Kharchenko Vyacheslav – DrS, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity National aerospace university "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5352-077X, Scopus Author ID: 22034616000.