

УДК: 004.942, 004.896

Д. В. ФЕДАСЮК, С. Б. ВОЛОЧІЙ

Національний університет "Львівська політехніка", Україна

МЕТОДИКА РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ СТОХАСТИЧНИХ СИСТЕМ

Під час використання технології побудови аналітичних моделей поведінки відмовостійких програмно-апаратних систем у вигляді систем диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена треба здійснити безпомилкове розроблення графа станів і переходів. Існує технологія побудови аналітичних моделей поведінки, в якій розроблення графа станів і переходів здійснюється на основі формалізованого представлення об'єкта дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі. В статті представлено методика розроблення структурно-автоматних моделей, яка дозволяє автоматизувати цей процес.

Ключові слова: дискретно-неперервна стохастична система, граф станів і переходів, відмовостійкі програмно-апаратні системи, структурно-автоматна модель

Вступ

При розв'язанні задачі синтезу відмовостійких програмно-апаратних систем необхідно отримати показники надійності для багатьох варіантів реалізації структури і надійної поведінки.

Розроблення моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів є етапом в технології побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки. Як відомо дискретно-неперервні стохастичні моделі функціональної поведінки складних інформаційних систем дають можливість визначати статистичні показники їх ефективності. Дискретно-неперервні стохастичні моделі надійної поведінки дають можливість визначати статистичні показники їх надійності.

1. Використання дискретно-неперервних стохастичних моделей надійності в існуючих програмних комплексах і спосіб їх представлення

Для надійного проектування складних технічних систем є розповсюдженими програмні комплекси: RELEX (Relax software Corporation, США) [1 - 4]; ITEM Software (Великобританія) [5]; A.L.D. Group (Ізраїль) [6]; ISOGRAPH (Великобританія) [7]. В склад цих програмних комплексів входить аналітичний модуль марковського аналізу (Markov Analysis). Цей модуль сприймає об'єкт дослідження у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи марковського типу, яка має бути представлена графом станів і переходів.

Модуль Markov Analysis програмного комплексу Relax reliability studio 2007 оснащений графічним редактором, за допомогою якого на екрані комп'ютера формується граф станів і переходів. Для кожної

вершини і дуги графа задається інформація для їх зображення і дані для обчислень. Інформація для зображення вершин і дуг включає в себе: колір, форму і розмір вершин; товщину, стиль і колір дуги; текст і формат надписів. Для обчислень вводяться такі дані: для вершин – тип стану (працездатний, непрацездатний, деградація), початковий стан (0 або 1), прибуток (або збитки) за одиницю часу перебування в даному стані; для дуг – інтенсивність переходу і прибуток (або збитки) за перехід в стан.

В деяких програмних комплексах для введення графа станів використовується заповнення інфінітезимальної матриці (*матриця інтенсивностей переходів однорідного в часі марковського процесу*).

Однак розроблення саме графа станів покладається на користувача і представляє собою інтелектуальну (не формалізовану) задачу, розв'язання якої часто називають "ручним" і вона вимагає великих витрат часу. Наприклад, коли модель поведінки відмовостійкої програмно-апаратної системи сягає 200 станів, то витрати часу на розроблення графа станів і переходів становлять не менше 100 годин. При цьому існує висока ймовірність внесення помилок в розроблений граф.

2. Відомі методики розроблення моделей поведінки у вигляді графа станів і переходів

2.1. Методика розроблення графа станів за допомогою вербального представлення його станів і переходів

У розробників складних технічних систем склалася існує традиція, що розроблення моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів ведеться через вербальне представлення його станів. Встано-

влення переходів між ними здійснюється на основі розуміння проєктантом (розробником) можливих напрямків розгортання (слідування) випадкових дискретно-неперервних процесів.

В статті [8] описано процес розроблення моделі процесу експлуатації корабельної радіолокаційної станції у вигляді графа станів і переходів. На основі логічного аналізу вербальної моделі процесу експлуатації корабельної радіолокаційної станції автори складають опис станів і можливих переходів між станами.

В роботі [9] описана методика побудови математичної моделі оцінки готовності однокамерних суднохідних шлюзів у вигляді графа станів. Цікаво (інформативно) представлений перший пункт методики: "Виявлення можливих ознак виділення станів, визначення їх змісту на основі концептуальної моделі функціонування суднохідних шлюзів".

В книжці [10 с. 76-78, с. 108-110, с. 127-130, с. 142-144] описано процес розроблення моделей технічного обслуговування систем різного призначення з почасовою надмірністю у вигляді графа станів.

В книжці [11 с. 283-285, с. 312-314] описано процес розроблення моделей стратегій обслуговування систем без врахування їх структури і з урахуванням структури, що складається з довільної кількості послідовно з'єднаних елементів (блоків, підсистем).

В практиці методика розроблення графа станів на основі вербального представлення його станів і переходів використовується для об'єктів дослідження з кількістю станів до 10 – 20.

2.2. Методика розроблення графа станів, в основу якої покладено принцип фрагментації

Для складних об'єктів, у яких кількість станів сягає кількох сотень, в монографії [12, с. 275-345] запропоновано методику побудови графа на основі принципу фрагментації. Згідно принципу фрагментації на першому етапі із всієї сукупності станів виділяються типові групи станів (фрагмента генерального (головного) графа станів). Для кожної типової групи станів є характерним: протікання локальних процесів, переходи в іншу типову групу або інші типові групи станів і багатократне повторення типової групи в генеральному (головному) графі станів. Для кожної групи здійснюється розроблення графа станів, який є фрагментом генерального (головного) графа станів.

Треба зазначити, що ця методика розроблення графа станів не передбачає автоматизації його побудови. Так як процес побудови графа станів є "ручним", то він вимагає великих витрат часу і існує велика ймовірність внесення помилок. При розв'язанні

задач синтезу алгоритмів поведінки складних інформаційних систем треба будувати багато варіантів моделі у вигляді графа станів. Цей процес має велику працездатність.

2.3. Методика розроблення графа станів, в основу якого покладено комбінаторний підхід

Комбінаторний підхід для побудови графа станів використовує векторне представлення станів [13 - 15]. Цей підхід не враховує надійності поведінки відмовостійкої системи, створює стани об'єкта дослідження, які в реальності не існують.

2.4. Методика розроблення графа станів на основі структурно-автоматної моделі об'єкта дослідження

В монографії [16, с. 59 - 93] описано методику побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі. Структурно-автоматна модель це формалізоване представлення структури і поведінки об'єкта дослідження.

Достоїнством методики є можливість автоматизувати побудову графа станів, що суттєво зменшує затрати часу на його побудову при зміні параметрів об'єкта дослідження. Це дуже важливо при розв'язанні задач структурного і параметричного синтезу відмовостійких систем і систем масового обслуговування через багатоваріантний аналіз. В цьому методі відповідальність за безпомилкову побудову моделей у вигляді графа станів лягає на структурно-автоматну модель об'єкта дослідження.

Розроблення структурно-автоматних моделей є інтелектуальною задачею. Вхідними даними є: векторне представлення стану, базові події, ймовірності успішного завершення процедур, інтенсивності базових подій.

Методика розроблення графа станів на основі структурно-автоматної моделі є дуже зручною для розв'язання задач параметричного та структурного синтезу відмовостійких систем [17, 18, 19], систем масового обслуговування [20], систем охоронної сигналізації [21] та інших складних технічних систем.

Що представляє собою структурно-автоматна модель? Чим (як) забезпечується необхідний ступінь адекватності структурно-автоматної моделі? Розроблення структурно-автоматної моделі розпочинається з вибору параметрів об'єкта дослідження, які мають бути відображені в моделі. Наступними кроками має бути:

- 1) обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан об'єкта дослідження;
- 2) визначення базових подій в алгоритмі пове-

дінки об'єкта дослідження;

3) складання формалізованого опису ситуацій, в яких відбувається базова подія (цей пункт виконується для кожної базової події);

4) компонування формул розрахунку інтенсивності базової події (для кожної ситуації);

5) складання правил модифікації компонент вектора стану (для кожної ситуації).

б) формування умови попадання в поглинаючий стан, якщо він є актуальним. Наприклад, для відмовостійких систем ми розрізняємо стан "відмовостійка система є працездатною при наявності несправних елементів" і стан "відмовостійка система є непрацездатною, після того як відбулася критична відмова". Тоді стан, коли "відмовостійка система є непрацездатною", треба представити як поглинаючий.

Отже ключовими моментами, які визначають ступінь адекватності структурно-автоматної моделі є: вибір параметрів об'єкта дослідження, які мають бути відображені в моделі; кількість компонент вектора стану; деталізація представлення базових подій, а відповідно і ситуацій, в яких вони відбуваються.

Як краще організувати процес розроблення структурно-автоматної моделі? Для виявлення і виправлення можливих помилок в структурно-автоматній моделі, має бути передбачена процедура валідації. Так як згідно методу побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі результатом має бути модель об'єкта дослідження у вигляді графа станів, то для проведення процедури валідації необхідно мати тестову модель. Розроблення тестової моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів здійснюється за допомогою методики побудови графа на основі базових подій [22].

3. Постановка задачі

Так як розроблення структурно-автоматної моделі є складним інтелектуальним процесом з великими витратами часу, то бажаною є його автоматизація (хоча би часткова).

В чому ідея запропонованої методики розроблення структурно-автоматної моделі? Обов'язковою процедурою в розробленні структурно-автоматної моделі є її валідація [22]. Методика валідації структурно-автоматної моделі передбачає розроблення тестової моделі у вигляді графа станів. Ідея запропонованої методики розроблення структурно-автоматної моделі полягає в тому, щоб в першу чергу здійснити розроблення тестової моделі. А відтак на основі графа станів (тестова модель) за допомогою запропонованих процедур визначити компоненти структурно-автоматної моделі.

4. Методика розроблення структурно-автоматних моделей об'єктів дослідження

Методику розроблення структурно-автоматної моделі подаємо разом з прикладом її реалізації для відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням за правилом "2 з 3". Конфігурація відмовостійкої системи представлена на рис. 1, де використані такі позначення: ПАС – програмно-апаратна система, МЕ – мажоритарний елемент. Для несправних програмно-апаратних систем передбачено відновлення (заміна). Кількість відновлень обмежена. Мажоритарний елемент відновленню не підлягає.

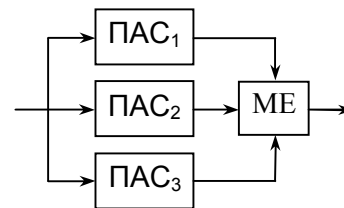


Рис. 1. Конфігурація відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

Параметри відмовостійкої системи, які треба відобразити в моделі:

- інтенсивність відмов ПАС – $\lambda_{\text{ПАС}}$;
- інтенсивність відмов МЕ – $\lambda_{\text{МЕ}}$;
- кількість обумовлених відновлень (замін) ПАС – k_v ;
- середнє значення тривалості відновлення (заміни) ПАС – t_v .

4.1. Розроблення графа станів на основі базових подій

Визначення базових подій. Для визначення базових подій необхідно прийняти до уваги всі процеси і процедури, які відображені (враховані) в алгоритмі поведінки об'єкта дослідження. Для процедур властивими є події, які представляють їх початок і закінчення. Кожна процедура характеризується середнім значенням її тривалості. Події, що представляють закінчення процедури вважаються базовими подіями [16, с. 65 - 68].

До базових подій також відносяться події зовнішніх і внутрішніх процесів, з якими взаємодіє об'єкт дослідження в процесі функціонування і які впливають на його стан. Наприклад, збої в роботі програмно-апаратної системи, надходження заявок в систему масового обслуговування. Процеси характеризуються середнім значенням інтервалу часу між сусідніми подіями.

Для визначення базових подій, події, що стосуються кожної процедури і кожного процесу, зручно (доцільно) представляти парами. Для відмовостійкої системи, що розглядається, такі події подані в таблиці 1.

Обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан об'єкта дослідження. Компонента V_1 представляє поточне значення кількості працездатних ПАС. Ця компонента може приймати такі значення: $V_1 = 3$ – справними є 3 ПАС, $V_1 = 2$ – справними є 2 ПАС, $V_1 = 1$ – справною є 1 ПАС. Початкове значення компоненти $V_1 = 3$;

Компонента V_2 представляє стан МЕ. Ця компонента може приймати такі значення: $V_2 = 1$ – МЕ справний, $V_2 = 0$ – МЕ несправний; початкове значення компоненти $V_2 = 1$;

Компонента V_3 представляє поточне значення кількості використаних відновлень. Ця компонента може приймати такі значення: $V_3 = 0, 1, \dots, k_b$. Початкове значення компоненти $V_3 = 0$;

Компонента V_4 відображає можливість відновлення ПАС. Ця компонента може приймати такі значення: $V_4 = 1$ – відновлення ПАС можливе, $V_4 = 0$ – відновлення ПАС не можливе. Початкове значення компоненти $V_4 = 1$.

Умова виникнення критичної відмови (КВ) для відмовостійкої системи, що розглядається, формулюється так: критична відмова настає тоді, коли залишається одна працездатна ПАС або втрачає працездатність МЕ. Формалізоване представлення умови виникнення КВ має такий вигляд: $(V_1=1) \text{ OR } (V_2=0)$.

Розроблення графа станів за методикою побудови графа станів на основі базових подій. Вхідними даними є: базові події алгоритму поведінки відмовостійкої системи, компоненти вектора стану, параметри відмовостійкої системи. Кількість обумовлених відновлень для програмно-апаратних систем $k_b = 2$. Результати побудови заносимо в таблицю 2,

де в колонку 1 заносимо номер кроку; в колонку 2 – номер попереднього стану, що розглядається, і номер актуальної базової події; в колонки 3, 4, 5 і 6 – значення компонент вектора стану, що наступає після базової події; в колонку 7 – присвоєний номер стану; в колонку 8 – номер попереднього стану, з якого здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 2), і номер наступного стану, в який здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 7); в колонку 9 – формула розрахунку значення інтенсивності базової події, яка розглядається на цьому кроці.

Розроблення графа станів здійснюється в такій послідовності:

Крок 1. Формуємо початковий стан графа (ПСГ): $V_1 = 3, V_2 = 1, V_3 = 0, V_4 = 1$. Присвоюємо йому №1.

Крок 2. Розглядаємо стан 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП1: Так, вона є актуальною так як всі ПАС до цієї події були працездатними. БП1 ініціює зменшення кількості працездатних ПАС $V_1 := V_1 - 1 = 2$ і початок процедури відновлення несправної ПАС $V_3 := 1$. Так як цей стан ($V_1 = 2, V_2 = 1, V_3 = 1, V_4 = 1$) отримано вперше, то йому присвоюється №2. Фіксується перехід із стану 1 в стан 2. В стані 1 є справними і працюють всі ПАС. Тому інтенсивність БП1 визначається за формулою $3\lambda_{\text{ПАС}}$.

Крок 3. Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо чи є актуальною для цього стану базова подія БП2: так, вона є актуальною бо МЕ є працездатним. БП2 ініціює зміну компоненти $V_2 := 0$. Цей стан ($V_1 = 3, V_2 = 0, V_3 = 0, V_4 = 1$) отримано вперше. Так як він представляє критичну відмову відмовостійкої системи, для нього присвоюємо позначення КВ. Фіксується перехід із стану 1 в стан КВ. Інтенсивність БП2 визначається параметром $\lambda_{\text{МЕ}}$.

Ці і всі подальші результати побудови графа станів на кроках з 3 до 15 представлені в таблиці 2.

Таблиця 1

Події надійнісної поведінки відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

Пор. №	Подія - початок	Подія - закінчення	Сер. знач. тривалості
1	Початок роботи ПАС (з моменту початку експлуатації або з моменту закінчення чергового відновлення)	БП 1: Відмова ПАС	$1/\lambda_{\text{ПАС}}$
2	Початок роботи МЕ (з моменту початку експлуатації)	БП 2: Відмова МЕ	$1/\lambda_{\text{МЕ}}$
3	Початок процедури відновлення несправної ПАС	БП 3: Закінчення процедури відновлення несправної ПАС	t_b

Таблиця 2

Граф станів і переходів для відмовостійкої системи з кількістю відновлень ПАС $k_b = 2$

№ кроку	Попередній стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БП1	2	1	1	1	2	1 → 2	$3\lambda_{ПАС}$
3	1БП2	3	0	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
4	2БП1	1	1	1	1	КВ	2 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$
5	2БП2	2	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	2 → 3	$1/t_b$
7	3БП1	2	1	2	1	4	3 → 4	$3\lambda_{ПАС}$
8	3БП2	3	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
9	4БП1	1	1	2	1	КВ	4 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$
10	4БП2	2	0	2	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	4 → 5	$1/t_b$
12	5БП1	2	1	2	0	6	5 → 6	$3\lambda_{ПАС}$
13	5БП2	3	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
14	6БП1	1	1	2	0	КВ	6 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$
15	6БП2	2	0	2	0	КВ	6 → КВ	$\lambda_{МЕ}$

4.2. Методика розроблення структурно-автоматної моделі на основі графа станів

Ідея методики розроблення структурно-автоматних моделей на основі графа станів представлена в [23].

Вхідними даними є: базові події і граф станів, побудований на основі базових подій (табл. 2). Компонентами структурно-автоматної моделі є:

- базові події;
- формалізований опис всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія (складаємо для кожної базової події);
- формули розрахунку інтенсивностей базової події (формули компонується для кожної ситуації);
- правила модифікації компонент вектора стану (правила складаються (формулюються) для кожної ситуації).

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія, необхідно їх виявити. Виявлення ситуацій здійснюється на основі вибору наступного після БП і попереднього станів та їх порівняння. Вибір цих пар станів здійснюється за такими двома ознаками:

- 1) вибираються стани, що утворюються (формулюються) після базової події, яким відповідають однакові формули розрахунку інтенсивності цієї БП;
- 2) із вибраних станів для складання опису ситуації залишаються ті, у яких зміна стану відносно

попереднього стану обумовлена зміною однакових компонент вектора стану.

Нагадаємо, що в опис ситуації входять умова та обставини. Умова визначає саму можливість того, що БП відбудеться. Обставини, за яких відбувається БП, визначають можливий варіант наступного стану. Від кількості обставин, залежить кількість варіантів наступного стану.

Методика складання (формування) формалізованого опису ситуацій для кожної базової події показана нижче на прикладах.

Визначені компоненти структурно-автоматної моделі заносимо в таблицю 6:

- в колонку 1 заносимо базову подію;
- в колонку 2 – формалізований опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія;
- в колонку 3 – формули розрахунку інтенсивностей базової події (ФРІБП);
- в колонку 4 – правила модифікації компонент вектора стану (ПМКВС).

Така форма представлення структурно-автоматної моделі відповідає формі діалогового вікна програмного засобу ASNA [24].

Розроблення структурно-автоматної моделі здійснюється в такій послідовності:

Визначаємо ситуації для базової події БП1.

Крок 1. З таблиці 2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП1 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці 3.

Таблиця 3

Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БПІ

№ кроку	Попередній стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БПІ	2	1	1	1	2	1 → 2	$3\lambda_{ПАС}$
4	2БПІ	1	1	1	1	КВ	2 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$
6	2БПЗ	3	1	1	1	3	2 → 3	$1/t_b$
7	3БПІ	2	1	2	1	4	3 → 4	$3\lambda_{ПАС}$
9	4БПІ	1	1	2	1	КВ	4 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$
11	4БПЗ	3	1	2	1	5	4 → 5	$1/t_b$
12	5БПІ	2	1	2	0	6	5 → 6	$3\lambda_{ПАС}$
14	6БПІ	1	1	2	0	КВ	6 → КВ	$2\lambda_{ПАС}$

Крок 2. Для БПІ формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БПІ мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події – $3\lambda_{ПАС}$) до 1-ї ситуації, в якій відбувається БПІ, слід віднести стани 1, 3 і 5. За другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану одночасно в компонентах V1 і V3) 1-у ситуацію формують (показують) стани 1 і 3. На основі аналізу станів 1 і 3 разом з наступними для них станами 2 і 4 формуємо формалізований опис 1-ї ситуації:

$$(V1 = 3) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (V3 < k_b) \text{ AND } (V4 = 1).$$

Формула для визначення інтенсивності базової події (ФРІБП) має вигляд: $3\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) є таким:

$$V1:=V1-1; V3:=V3+1.$$

Крок 3. Для БПІ формуємо опис 2-ї ситуації, в якій вона відбувається. З 1-ї ситуації випав стан 5, для якого наступним є стан 6. Аналіз стану 5 разом з наступним станом 6 показує, що 2-а ситуація має такий формалізований опис:

$$(V1 = 3) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (V3 = k_b) \text{ AND } (V4 = 1).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $3\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: $V1:=V1-1; V4:=0$.

Крок 4. Для БПІ формуємо опис 3-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БПІ мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події – $2\lambda_{ПАС}$) до 3-ї ситуації, в якій відбувається БПІ, слід віднести стани 2, 4 і 6. Ці ж стани формують 3-ю ситуацію і

за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V1). Аналіз станів 2, 4 і 6 разом з наступними для них станами КВ показує, що 3-я ситуація має такий формалізований опис:

$$(V1 = 2) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (0 < V3 \leq k_b) \text{ AND } \text{ AND } ((V4 = 1) \text{ OR } (V4=0)).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $2\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: $V1:=V1-1$. Так як не розглянутих станів в таблиці 3 не залишилось, переходимо на крок 5.

Визначаємо ситуації для базової події БП2.

Крок 5. З таблиці 2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП2 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці 4.

Крок 6. Для БП2 формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП2 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події $\lambda_{МЕ}$) до 1-ї ситуації слід віднести стани 1, 2, 3, 4, 5 і 6. Ці ж стани формують 1-у ситуацію і за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V2). Аналіз станів 1, 2, 3, 4, 5 і 6 разом з наступними для них станами КВ показує, що 1-а ситуація має такий формалізований опис:

$$((V1 = 2) \text{ OR } (V1 = 3)) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } \text{ AND } (V3 \leq k_b) \text{ AND } ((V4 = 1) \text{ OR } (V4=0)).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $\lambda_{МЕ}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: $V2:=0$. Так як не розглянутих станів в таблиці 4 не залишилось, переходимо на крок 7.

Таблиця 4

Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БП2

№ кроку	Попередній стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БП1	2	1	1	1	2	1 → 2	$3\lambda_{ПАС}$
3	1БП2	3	0	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
5	2БП2	2	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	2 → 3	$1/t_B$
7	3БП1	2	1	2	1	4	3 → 4	$3\lambda_{ПАС}$
8	3БП2	3	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
10	4БП2	2	0	2	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	4 → 5	$1/t_B$
12	5БП1	2	1	2	0	6	5 → 6	$3\lambda_{ПАС}$
13	5БП2	3	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
15	6БП2	2	0	2	0	КВ	6 → КВ	$\lambda_{МЕ}$

Визначаємо ситуації для базової події БП3.

Крок 7. З таблиці 2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП3 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці 5.

Крок 8. Для БП3 формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП3 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події $1/t_B$) до 1-ї ситуації слід віднести стани 2 і 4. Ці ж стани формують 1-у ситуацію і за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V1). Аналіз станів 2 і 4 разом з наступними для них станами 3 і 5 показує, що 1-а ситуація, в якій відбувається БП3 має такий формалізований опис:

$$(V1 = 2) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (0 < V3 \leq k_B) \text{ AND } \text{AND } (V4 = 1).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $1/t_B$. Правило модифікації компонент

вектора стану є таким: $V1 := V1 + 1$. Так як не розглянутих станів в таблиці 5 не залишилось і розглянути всі базові події, переходимо на крок 9.

Валідація структурно-автоматної моделі.

Крок 9. Останнім етапом розроблення структурно-автоматної моделі є її валідація. В методиці валідації структурно-автоматних моделей використовується тестова модель об'єкта дослідження у вигляді графа станів, який розроблено на основі базових подій. Методика валідації передбачає виконання таких завдань:

– порівняння графа станів, сформованого на основі структурно-автоматної моделі з тестовою моделлю (граф станів побудований на основі базових подій);

– локалізація та аналіз компонент структурно-автоматної моделі з метою виявлення помилок та їх виправлення.

Результати розроблення структурно-автоматної моделі зведені в таблиці 6.

Таблиця 5

Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БП3

№ кроку	Попередній стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	1БП1	2	1	1	1	2	1 → 2	$3\lambda_{ПАС}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	2 → 3	$1/t_B$
7	3БП1	2	1	2	1	4	3 → 4	$3\lambda_{ПАС}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	4 → 5	$1/t_B$

Таблиця 6

Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються БП	ФРІБП	ПМКВС
1	2	3	4
БП 1	1. $(V1 = 3) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (V3 < k_b) \text{ AND } (V4 = 1)$	$3\lambda_{\text{ПАС}}$	$V1:=V1-1; V3:=V3+1$
	2. $(V1 = 3) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (V3 = k_b) \text{ AND } (V4 = 1)$	$3\lambda_{\text{ПАС}}$	$V1:=V1-1; V4:=0$
	3. $(V1 = 2) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (0 < V3 \leq k_b) \text{ AND } ((V4 = 1) \text{ OR } (V4=0))$	$2\lambda_{\text{ПАС}}$	$V1:=V1-1$
БП 2	1. $((V1 = 2) \text{ OR } (V1 = 3)) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (V3 \leq k_b) \text{ AND } ((V4 = 1) \text{ OR } (V4=0))$	$\lambda_{\text{МЕ}}$	$V2:=0$
БП 3	1. $(V1 = 2) \text{ AND } (V2 = 1) \text{ AND } (0 < V3 \leq k_b) \text{ AND } (V4 = 1)$	$1/t_b$	$V1:=V1+1$

Побудова графа станів на основі структурно-автоматної моделі здійснюється за алгоритмом, описаним в [16 с. 79 - 92].

Висновок

В статті показана методика, яка дає можливість автоматизувати процес розроблення структурно-автоматних моделей. Це дозволяє зменшити витрати часу на розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей об'єктів дослідження (проекування) і відповідно на розв'язання задач їх системного аналізу та синтезу.

Література

1. Програмний комплекс *Windchill Quality Solutions (formerly Relx)* [Electronic source]. – Режим доступу: <http://www.crimsonquality.com/products/markov/>. – 28.03.2016 р.
2. Строгонов, А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем [Электронный ресурс] / А. Строгонов, В. Жаднов, С. Полесский // Компоненты и технологии, 2007. – № 5. – С. 183 – 190. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/device/2007_5_183.php. – 28.03.2016.
3. Расчет реальной надежности машин. Методики, программные средства, примеры [Электронный ресурс] / В. Б. Альгин, А. В. Вербицкий, Д. В. Мишута, С. В. Сиренко // Механика машин, механизмов и материалов. – Минск, Республика Беларусь, 2011. – № 2 (15). – С. 11 – 17. – Режим доступа: http://mmmm.by/pdf/ru/2011/2_2011/2.pdf. – 31.01.2016.
4. Основные положения и методические основы решения задач оценки надежности, безопасности и риска систем на основе технологии автоматизированного моделирования, реализованной в программных комплексах RELEX, ACM И RISK SPECTRUM [Электронный ресурс] : Отчет о НИИ / ФГУП Санкт-Петербургский научно-

исследовательский и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» ; отв. исп. Еришов Г. А., Можжаев А. С., Викторова А. С. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 12 – 20. – Режим доступа: http://www.szma.com/nir_technology_2004.pdf. – 31.01.2016.

5. Програмный комплекс ITEM Software [Electronic source]. – Режим доступа: <http://www.itemuk.com/markov.html>. – 28.03.2016.

6. Програмный комплекс RAM Commander – Markov Chains Module [Electronic source]. – Режим доступа: <http://www.sohar.com/downloads/download-reliability-and-safety-software.html>. – 28.03.2016.

7. Програмный комплекс ISOGRAPH [Electronic source]. – Режим доступа: <http://www.isograph.com/software/reliability-workbench/markov-analysis/>. – 28.03.2016.

8. Адерихин, И. В. Метод и математические модели оценивания готовности судовых радиотехнических средств [Текст] / И. В. Адерихин, М. Г. Воротынцева, Л. В. Цветкова // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ. – 2015. – № 3. – С. 49–59.

9. Адерихина, Е. И. Метод и математические модели оценивания готовности однокамерных судовых иллюзов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 / Е. И. Адерихина. – М., 2000. – 20 с.

10. Технічне обслуговування систем з почасовою надмірністю [Текст] / Б. П. Креденцер, С. В. Ленков, А. І. Міночкін, Д. І. Мозилевич, М. І. Резніков. – К. : ВІПІ НТУУ "КПІ", 2009. – 172 с.

11. Каишанов, В. А. Теория надежности сложных систем (теория и практика) [Текст] / В. А. Каишанов, А. И. Медведев. – М. : "Европейский центр по качеству", 2002. – 470 с.

12. Применение компьютерных технологий для оценивания надежности и безопасности программно-технических комплексов [Текст] / Ю. Н. Соколов, В. С. Харченко, В. М. Илюшко, Ю. Л. Поночовный, М. Ф. Бабаков / Под ред. Ю.Н. Соколова и В.С. Харченко. – Харьков : Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", 2013. – 458 с.

13. Половко, А. М. Основы теории надежности [Текст] / А. М. Половко, С.В. Гуров. – Санкт-Петербург : БХВ Петербург, 2008. – 704 с.

14. Половко, А. М. Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А. М. Половко, С. В. Гуров. – Санкт-Петербург : БХВ Петербург, 2006. – 557 с.

15. Щербовських, С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності відновлюваних багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження [Текст] / С. В. Щербовських. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 296 с.

16. Волочий, Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [Текст] / Б. Ю. Волочий. – Львів : Вид-во Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. – 220 с.

17. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic source] / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskiy, Oleksandr Mulyak, Sergiy Volochiy // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management SMRLO 2016. – Israel, Beer Sheva, 15-18 February, 2016. – IEEE, 2016. – P. 347 – 356.

18. Надійнісна модель відмовостійкої програмно-апаратної системи на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням та автоматичним перезавантаженням програмного забезпечення [Текст] / Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, О. В. Муляк, М.М. Змисний // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 5 (64). – С. 221 – 226.

19. Волочий, Б. Ю. Проектування відмовостійких систем для джерел безперебійного електроживлення [Текст] // Б. Ю. Волочий, Д. С. Кузнецов / Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ, 2012. – Вип. 48. – С. 149-158.

20. Волочий, Б. Проектирование эффективных стратегий технического обслуживания. Математические модели, алгоритмы и методики [Электронный ресурс] // Богдан Волочий, Леонид Озирковский, Игорь Кулик. – Германия : Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 160 с. – Режим доступа: <https://www.lap-publishing.com/.../978-3-659-63366-9/>. – 28.03.2016.

21. Volochiy, B. Synthesis of Guard Signaling Complex Structure with a Glance of Possible Layouts of Seismic Sensors [Text] / Bohdan Volochiy, Volodymyr Onishchenko, Yuriy Salnik // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, 23-26 February 2016. – Lviv, 2016. – P. 279 – 283.

22. Яковина, В. С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем [Текст] / В. С. Яковина, С. Б. Волочий // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СИТЕМ-2012) : Матеріали III-ї Всеукраїн-

ської науково-практичної конференції. – Львів, 2012. – С. 234–237.

23. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems [Text] / D. Fedasyuk, S. Volochiy // Computer science and information technologies: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015. – Lviv, 2015. – P. 5 - 8.

24. Волочий, Б. Ю. Системотехнічне проектування телекомунікаційних мереж. Практикум [Текст] : навчальний посібник / Б. Ю. Волочий, Л.Д. Озірковський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 128 с.

References

1. Program complex Windchill Quality Solutions (formerly Relex). Available at: <http://www.crimsonquality.com/products/markov/> (accessed 28.03.2016)

2. Stogonov, A., Zhadnov, V., Poleskiy, S. Obzor programmnyh kompleksov po raschetu nadezhnosti slozhnyh tehnikeskikh sistem [Review of the software for reliability assessment of complex technical systems]. Komponenty i tekhnologiyi, 2007, no. 5, pp. 183-190. Available at: http://www.kit-e.ru/articles/device/2007_5_183.php. (accessed 28.03.2016) (In Russian).

3. Al'gin, V. B., Verbickij, A. V., Mishuta, D. V., Sirenko, S. V. Raschet real'noj nadezhnosti mashin. Metodiki, programmnye sredstva, primery [The assessment of real reliability of cars. Techniques, software, examples]. Mehanika mashin, mehanizmov i materialov. Minsk, Republic of Belarus, 2011, no. 2 (15), pp. 11-17. Available at: http://mwww.by/pdf/ru/2011/2_2011/2.pdf. (accessed 31.01.2016) (In Russian).

4. Osnovnye polozheniya i metodicheskie osnovy resheniya zadach ocenki nadezhnosti, bezopasnosti i riska sistem na osnove tehnologii avtomatizirovannogo modelirovaniya, realizovannoj v programmnyh kompleksah RELEX, ASM I RISK SPECTRUM [Basic provisions and methodical bases of the solution of problems of an assessment of reliability, safety and risk of systems on the basis of the technology of the automated modeling realized in the program RELEX, ASM And RISK SPECTRUM complexes]. Otchet o NIR. FGUP Sankt-Peterburgskij nauchno-issledovatel'skij i proektno-konstruktorskij institut «ATOMJENERGOPROEKT»; otv. isp. Ershov G. A., Mozhaev A. S., Viktorova A. S., Sankt-Peterburg, 2005, pp. 12-20. Available at: http://www.szma.com/nir_technology_2004.pdf (accessed 31.03.2016) (In Russian).

5. Program complex ITEM Software. Available at: <http://www.itemuk.com/markov.html>. (accessed 28.03.2016).

6. Program complex RAM Commander – Markov Chains Module. Available at: <http://www.sohar.com/downloads/download-reliability-and-safety-software.html>. (accessed 28.03.2016).

7. Program complex ISOGRAPH. Available at:

<http://www.isograph.com/software/reliability-workbench/markov-analysis/> (accessed 31.03.2016).

8. Aderihin, I. V., Vorotynceva, M. G., Cvetkova, L. V. Metod i matematicheskie modeli ocenivaniya gotovnosti sudovyh radiotekhnicheskikh sredstv [Method and mathematical models of assessment of availability of the marine radio aids]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2015, no. 3, pp. 49–59.

9. Aderihina, E. I. Metod i matematicheskie modeli ocenivaniya gotovnosti odnokamernykh sudohodnykh shljuzov. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Method and mathematical models of estimation of readiness of single-chamber navigable locks. Avtoref. diss. ... cand. tech. sci.]. Moscow, 2000, 20 p.

10. Kredentser, B. P., Lyenkov, S. V., Minochkin, A. I., Mohylevych, D. I., Reznikov, M. I. *Tekhnichne obsluhovuvannya system z pochasovoyu nadmirmistyu* [Maintenance of systems with temporary redundancy]. Kyiv, Viys'kovyy instytut telekomunikatsiy ta informatyzatsiyi Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KPI" Publ., 2009. 172 p.

11. Kashtanov, V.A., Medvedev, A.I. *Teorija nadezhnosti slozhnykh sistem (teorija i praktika)* [Theory of reliability of complex systems (theory and practice)]. Moscow, "Evropejskij centr po kachestvu" Publ., 2002. 470 p.

12. Sokolov, Ju. N., Kharchenko, V. S., Iljushko, V. M., Ponochovnyj, Ju. L., Babakov, M. F. *Primenenie komp'yuternykh tekhnologij dlya ocenivaniya nadezhnosti i bezopasnosti programmno-tekhnicheskikh kompleksov* [Application of computer technologies for software- hardware complexes reliability and safety assessment]. Sokolov Ju. N., Kharchenko V. S. (editors). Kharkiv, National aerospace university named after N. Zhukovskiy "KhAI" Publ., 2013. 458 p.

13. Polovko, A. M., Gurov, S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Basis of the theory of reliability]. Sankt-Peterburg, BHV Peterburg Publ., 2008. 704 p.

14. Polovko, A. M., Gurov, S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum* [Basis of the theory of reliability. Practical work]. Sankt-Peterburg, BHV Peterburg Publ., 2006. 557 p.

15. Shcherbovs'kykh, S. V. *Matematychni modeli ta metody dlya vyznachennya kharakterystyk nadiynosti vidnovlyuvanykh bahatoterminal'nykh system iz urakhuvannyam pererozpodilu navantazhennya* [Mathematical models and methods for definition of characteristics of reliability of the restored multiterminal systems, with redistribution of loading considered]. Lviv, Lvivska politekhnika Publ., 2012. 296 p.

16. Volochiy, B. Yu. *Tekhnolohiya modelyuvannya alhorytmiv povedinky informatsiynykh system* [Technology of modeling of algorithms of behavior of information systems]. Lviv, Lvivska politekhnika Publ., 2004. 220 p.

17. Volochiy, Bogdan, Ozirkovskiy, Leonid, Mulyak, Oleksandr, Volochiy, Serhii. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method. In

Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO'16), Beer Sheva, Israel, February 15-18, 2016, pp. 347 - 356, IEEE CPS, 978-1-4673-9941-8/16, DOI 10.1109/SMRLO.2016.65.

18. Volochiy, B. Yu., Ozirkovskiy, L. D., Mulyak, O. V., Zmysnyy, M. M. Nadiynisna model' vidmovostiyykoyi prohramno-aparatnoyi systemy na osnovi mazhorytarnoyi struktury z kovznym rezervuvannyam ta avtomatychnym Perezavantazhennyam prohramnoho zabezpechennya [Model of reliability of fault-tolerant hardware and software system based on majoritarian structure with sliding redundancy and automatic software reboot]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy*, 2013, no. 5 (64), pp. 221 - 226.

19. Volochiy, B.Yu., Kuznyetsov, D.S. Proektuvannya vidmovostiyykoyi system dlya dzherel bezperebiynoho elektrozhyvlennya [Design of fault-tolerant systems for uninterruptible power supply]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyyivs'kyi politekhnichnyy instytut" Seriya – Radioelekhnika. Radioaparatabuduvannya*. Kyiv, 2012, vol. 48, pp. 149 - 158.

20. Volochiy, B., Ozirkovskiy, L., Kulik, I. *Proektirovanie jeffektivnykh strategiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya. Matematicheskie modeli, algoritmy i metodiki*. [Design of effective strategy of maintenance. Mathematical models, algorithms and techniques]. Saarbrücken, Deutschland, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 160 p. Available at: <https://www.lap-publishing.com/.../978-3-659-63366-9/> (accessed 28.03.2016).

21. Volochiy, B., Onishchenko, V., Salnik, Yu. Synthesis of Guard Signaling Complex Structure with a Glance of Possible Layouts of Seismic Sensors. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: *Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016*, 23-26 February 2016, Lviv, pp. 279 – 283.

22. Yakovyna, V. S., Volochiy, S. B. Prohramnyy modul' dlya rozrobky modeley povedinky skladnykh tekhnichnykh system [The software module for modeling the behavior of complex technical systems]. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi v ekonomitsi, menedzhmenti ta osviti (SITEM-2012): Materialy III-yi Vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi*. Lviv, 2012, pp. 234–237.

23. Fedasyuk, D., Volochiy, S. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems. Computer science and information technologies: *Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015*. Lviv, 2015, pp. 5 - 8.

24. Volochiy, B. Yu., Ozirkovskiy, L. D. *Systemotekhnichne proektuvannya telekomunikatsiynykh merezh. Praktikum: navchal'nyy posibnyk* [Systems engineering design of telecommunications networks. Practical work]. Lviv, Lvivska politekhnika Publ., 2012. 128 p.

Надійшла до редакції 10.03.2016, розглянута на редколегії 14.04.2016

МЕТОДИКА РОЗРАБОТКИ СТРУКТУРНО-АВТОМАТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ СТОХАСТИЧНЫХ СИСТЕМ

Д. В. Федасюк, С. Б. Волочий

При использовании технологии построения аналитических моделей поведения отказоустойчивых программно-аппаратных систем в виде систем дифференциальных уравнений Колмогорова - Чэпмена нужно осуществить безошибочную разработку графа состояний и переходов. Существует технология построения аналитических моделей поведения, в которой разработка графа состояний и переходов осуществляется на основе формализованного представления объекта исследования в виде структурно-автоматной модели. В статье представлена методика разработки структурно-автоматных моделей, которая позволяет автоматизировать этот процесс.

Ключевые слова: дискретно-непрерывная стохастическая система, граф состояний и переходов, отказоустойчивые программно-аппаратные системы, структурно-автоматная модель.

METHOD OF THE STRUCTURAL-AUTOMATON MODELS DEVELOPMENT FOR DISCRETE-CONTINUOUS STOCHASTIC SYSTEMS

D. V. Fedasyuk, S. B. Volochiy

During developing the analytical models of behavior of fault-tolerant hardware and software systems in form of Chapman-Kolmogorov differential equations system, states-transitions diagram should be developed. States-transitions diagram should contain no mistakes. There is a known technology of developing the analytical models of behavior, in which states-transitions diagram is developed from the formalized representation of an object of investigation, so called "structural-automaton model". This article presents a new method of structural-automaton models development. This new method allows to automate the structural-automaton models development process.

Keywords: discrete-continuous stochastic model, states-transitions diagram, software and hardware fault-tolerant system, structural-automaton model.

Федасюк Дмитро Васильович – д-р техн. наук, професор, проректор Національного університету "Львівська політехніка", Львів, Україна, e-mail: fedasyuk@gmail.com.

Волочий Сергій Богданович – аспірант кафедри програмного забезпечення, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна, e-mail: volochiy.s@gmail.com.

Dmytro Fedasyuk – Doctor of Science, Professor, Vice-Rector of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: fedasyuk@gmail.com.

Volochiy Serhiy Bohdanovych – PhD student, Lviv Polytechnic National University, Software Department, Lviv, Ukraine, e-mail: volochiy.s@gmail.com.