

## МЕТОДИКА РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ПРОДОВЖЕННЯМИ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ПРОЦЕДУР КОНТРОЛЮ, ПЕРЕМИКАННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ

© Федасюк Д., Волочій С., 2017

У технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких систем важливим етапом є розроблення графу станів і переходів. Є відомою методика розроблення графу станів і переходів, в основу якої покладено структурно-автоматну модель відмовостійкої системи. Ступінь формалізації методики побудови графу станів дав змогу її автоматизувати в програмному засобі ASNA. Якщо в структурно-автоматній моделі відсутні помилки, то граф станів будується безпомилково. Але актуальною залишається задача безпомилкового розроблення структурно-автоматної моделі. Наведено методику розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після закінчення процедур контролю, перемикання і відновлення, яка забезпечує безпомилкову їх побудову і в якій трудомісткі процедури піддаються автоматизації.

**Ключові слова:** відмовостійка система, надійнісна модель, дискретно-неперервна стохастична модель, граф станів і переходів, структурно-автоматна модель.

The development of states-transitions model is an important stage in the technology of the development of the discrete-continuous stochastic models of fault-tolerant systems. There is a known method of developing the states-transitions model, which is based on an algorithm of constructing the state-transitions models out of so-called “structural-automaton model”. This method is implemented in a software tool prototype called “ASNA”. If structural-automaton model is errorless, resulting states-transitions model will be errorless as well. Therefore, there is an actual problem of developing an errorless structural-automaton model. This paper presents the method of developing the structural-automaton models of fault-tolerant systems, which considers alternate outcomes of stochastic processes after completion of switching, recovering and controlling procedures. Presented method allows to develop errorless models as well as to automate laborious procedures.

**Key words:** fault-tolerant system, reliability modeling, discrete-continuous stochastic model, states-transitions model, states-transitions diagram, structural-automaton model

### Вступ

Під час розв’язання задачі синтезу відмовостійких програмно-апаратних систем необхідно отримати показники надійності для багатьох варіантів реалізації структури і надійнісної поведінки. Як відомо, дискретно-неперервні стохастичні моделі надійнісної поведінки відмовостійких систем дають можливість визначати статистичні показники їх надійності. Розроблення моделі об’єкта дослідження у вигляді графу станів є етапом у технології побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки.

Для надійнісного проектування складних технічних систем поширені програмні комплекси: RELEX (Relax software Corporation, США) [1]; ITEM Software (Великобританія) [2]; A.L. D. Group (Ізраїль) [3]; ISOGRAPH (Великобританія) [4]. До складу цих програмних комплексів входить

аналітичний модуль марковського аналізу (Markov Analysis). Цей модуль сприймає об'єкт дослідження у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи марковського типу, яку потрібно подати 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 графу задають інформацію для їх зображення і дані для обчислень. Інформація для зображення вершин і дуг містить: колір, форму і розмір вершин; товщину, стиль і колір дуги; текст і формат надписів. Для обчислень вводять такі дані: для вершин – тип стану (працездатний, непрацездатний, деградація), початковий стан (0 або 1), прибуток (або збитки) за одиницю часу перебування в цьому стані; для дуг – інтенсивність переходу і прибуток (або збитки) за перехід у стан.

У деяких програмних комплексах для введення графу станів використовують заповнення інфінітезимальної матриці (*матриця інтенсивностей переходів однорідного в часі марковського процесу*).

Однак розроблення саме графу станів покладається на користувача і являє собою інтелектуальну (не формалізовану) задачу, розв'язання якої часто називають “ручним” і яка потребує великих витрат часу. Наприклад, коли модель поведінки відмовостійкої програмно-апаратної системи сягає 200 станів, то витрати часу на розроблення графу станів і переходів становлять не менше 100 годин. При цьому існує висока ймовірність внесення помилок в розроблений граф. Огляд відомих методик розроблення моделей поведінки у вигляді графу станів і переходів наведено в статті [5].

У монографії [6, с. 59–93] описано методику побудови графу станів на основі структурно-автоматної моделі. Структурно-автоматна модель – це формалізоване представлення структури і поведінки об'єкта дослідження. Перевагою методики є можливість автоматизувати побудову графу станів, що суттєво зменшує затрати часу на його побудову у разі зміни параметрів об'єкта дослідження. В цій методиці відповідальність за безпомилкову побудову моделей у вигляді графу станів лягає на структурно-автоматну модель об'єкта дослідження.

### **Постановка задачі**

В статті [5] наведено методику розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем, в якій прийнято (вважається), що процедура відновлення несправної ПАС завжди є успішною. В реальності не кожне відновлення є успішним, тобто ймовірність успішного виконання процедури відновлення  $P_{uv} < 1$ . До цього слід додати, що у відмовостійких системах, де використовуються процедури контролю і перемикавання, ймовірності їх успішного виконання також є меншими від одиниці. Це означає, що в надійніших моделях відмовостійких систем має бути враховано альтернативне продовження випадкових процесів після закінчення процедур контролю, перемикавання і відновлення. Тобто в надійніших моделях мають бути враховані показники ефективності цих процедур, а саме ймовірність успішного виконання процедур контролю, перемикавання та відновлення. Як показали проведені дослідження, неврахування в надійніших моделях відмовостійких систем цих показників призводить до отримання суттєво завищених значень показників їх надійності. Тому актуальною залишається задача створення методики безпомилкового розроблення структурно-автоматної моделі (САМ) з урахуванням альтернативного продовження випадкових процесів після закінчення процедур контролю, перемикавання і відновлення. При цьому методика повинна відповідати вимозі, щоб ступінь формалізації її трудомістких операцій забезпечував (давав, відкривав) можливість їх автоматизованого виконання, а інтелектуальна складова розроблення САМ була зведена до мінімуму.

### **Методика розроблення структурно-автоматної моделі з альтернативними продовженнями процесів після процедур контролю, перемикавання і відновлення**

*У чому ідея запропонованої методики розроблення структурно-автоматної моделі?* Ідея запропонованої методики розроблення структурно-автоматної моделі полягає в тому, щоби насамперед розробити опорний граф станів і переходів. А відтак на основі цього графу станів за

допомогою запропонованих процедур визначати компоненти структурно-автоматної моделі. Цю ідею наведено в статті [7].

Методику розроблення структурно-автоматної моделі подаємо разом з прикладом її реалізації для відмовостійкої програмно-апаратної системи з однократним гарячим резервуванням, з урахуванням показників ефективності засобів контролю, перемикання та процедури відновлення. Для несправної програмно-апаратної системи (ПАС) передбачено відновлення (заміну). Кількість відновлень обмежена.

Показники надійності і ефективності складових відмовостійкої програмно-апаратної системи, які треба відобразити в моделі: інтенсивність відмов основної (працюючої) ПАС –  $\lambda_o$ ; інтенсивність відмов ПАС, яка перебуває в резерві –  $\lambda_r$ ; ймовірність успішного виконання процедури контролю –  $P_{uk}$ ; тривалість процедури контролю –  $t_k$ ; ймовірність успішного виконання процедури перемикання –  $P_{up}$ ; тривалість процедури перемикання –  $t_p$ ; ймовірність успішного виконання процедури відновлення –  $P_{uv}$ ; кількість зумовлених (запланованих) відновлень (замін) ПАС –  $K_v$ ; середнє значення тривалості процедури відновлення (заміни) ПАС –  $t_v$ .

**Визначення базових подій алгоритму поведінки відмовостійкої системи.** Для визначення базових подій необхідно взяти до уваги всі процеси і процедури, які відображені (враховано) 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, вважають базовими подіями [6, с. 65–68]. Для відмовостійкої системи, що розглядається, базові події подано в табл. 1.

Таблиця 1

**Події надійнісної поведінки відмовостійкої системи з однократним резервуванням**

№ з/п	Подія – початок	Подія – закінчення	Сер. знач. тривалості
1	Початок роботи ПАС (з моменту початку експлуатації або з моменту підключення після чергової відмови працюючої ПАС)	БП 1: Відмова основної (працюючої) ПАС	$1/\lambda_o$
2	Початок процедури контролю (з моменту появи відмови ПАС)	БП2: Закінчення процедури контролю	$t_k$
3	Початок процедури перемикання	БП3: Закінчення процедури перемикання	$t_p$
4	Початок процедури відновлення несправної ПАС	БП 4: Закінчення процедури відновлення несправної ПАС	$t_v$
5	Початок перебування ПАС у резерві	БП 5: Відмова ПАС під час перебування в резерві	$1/\lambda_r$

Зауважимо, що базові події БП2 і БП3 в моделі будуть зведеними з БП1, оскільки тривалості процедур контролю і перемикання є значно меншими від тривалостей безвідмовної роботи основної і резервної ПАС і від тривалості відновлення. Надалі позначатимемо ці події так: ЗБП2 і ЗБП3.

**Обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан відмовостійкої системи.** Компонента  $V_1$  представляє стан основної (працюючої) ПАС. Ця компонента може набувати таких значень:  $V_1 = 1$  – ПАС працездатна,  $V_1 = 0$  – ПАС непрацездатна. Початкове значення компоненти  $V_1 = 1$ . Компонента  $V_2$  представляє стан ПАС, яка перебуває в резерві. Ця компонента може набувати таких значень:  $V_2 = 1$  – ПАС працездатна,  $V_2 = 0$  – ПАС непрацездатна. Початкове значення компоненти  $V_2 = 1$ . Компонента  $V_3$  представляє поточне значення кількості використаних відновлень ПАС. Ця компонента може набувати таких значень:  $V_3 = 0, 1, \dots, K_v$ . Початкове значення компоненти  $V_3 = 0$ . Компонента  $V_4$  представляє поточне значення кількості ПАС у відмовостійкій конфігурації, яка враховує вилучення не придатної для подальшої експлуатації ПАС. Ця компонента може набувати таких значень:  $V_4 = 2, 1, 0$ . Початкове значення компоненти  $V_4 = 2$ .

Умова виникнення критичної відмови (КВ) для відмовостійкої системи, що розглядається, формулюється так: критична відмова настає тоді, коли на позиції основної ПАС залишається непрацездатна ПАС. Формалізоване представлення умови виникнення КВ має такий вигляд: ( $V_1=0$ ).

**Розроблення опорного графу станів за методикою його побудови на основі базових подій** [8]. Вхідними даними є: базові події алгоритму поведінки відмовостійкої системи, компоненти вектора стану, показники надійності основної і резервної ПАС, показники ефективності засобів контролю та перемикання та показник ефективності процедури відновлення. Кількість зумовлених відновлень для програмно-апаратних систем  $K_V = 2$ . Результати побудови заносимо до табл. 2, де в колонку 1 заносимо номер кроку; в колонку 2 – номер попереднього стану, що розглядається, і номер актуальної базової події; в колонку 3 – ймовірності альтернативного продовження процесу; в колонки 4, 5, 6 і 7 – значення компонент вектора стану, що настає після базової події; в колонку 8 – присвоєний номер стану; в колонку 9 – перехід із стану в стан: 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 8); в колонку 10 – формула розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан (ФРПП).

Розробляють опорний граф станів у такій послідовності:

*Крок 1.* Формуємо початковий стан графу:  $V_1 = 1, V_2 = 1, V_3 = 0, V_4 = 2$ . Присвоюємо йому №1.

*Крок 2.* Розглядаємо стан 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП1: вона є актуальною, бо основна ПАС до цієї події була працездатною. При цьому треба врахувати, що з БП1 є зведеними ЗБП2 і ЗБП3 і саме вони ініціюють 3 альтернативні продовження процесу з ймовірностями  $P_{uk}P_{up}, (1-P_{uk})$  і  $P_{uk}(1-P_{up})$ . З першим альтернативним продовженням БП1 ініціює переведення резервної ПАС у режим основної (працюючої)  $V_2:=0$  і початок процедури відновлення несправної ПАС  $V_3:=V_3+1$ . Оскільки цей стан  $\{V_1 = 1, V_2 = 0, V_3 = 1, V_4 = 2\}$  отримано вперше, то йому присвоюють №2. Фіксують перехід із стану 1 у стан 2. Оскільки інтенсивність БП1 становить  $\lambda_o$ , то інтенсивність переходу визначають за формулою  $\lambda_o P_{uk} P_{up}$ . З другим і третім альтернативними продовженнями БП1 не ініціює переведення резервної ПАС у режим основної (працюючої). Це означає, що відмовостійка система потрапляє в стан критичної відмови (КВ)  $V_1:=0$ . Разом з цим друге альтернативне продовження, зумовлене неуспішним закінченням процедури контролю, призводить до вилучення несправної ПАС з відмовостійкої конфігурації  $V_4:=V_4-1$ . Третє альтернативне продовження, зумовлене успішним закінченням процедури контролю і неуспішним закінченням процедури підключення резервної ПАС, призводить (дає команду) до початку процедури відновлення  $V_3:=V_3+1$ .

*Крок 2а.* Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП4. Ні, вона не є актуальною, бо жодна ПАС у цьому стані не перебуває в ремонті.

*Крок 3.* Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП5. Так, вона є актуальною, бо резервна ПАС у цьому стані відмовостійкої системи до цієї події була працездатною. При цьому треба врахувати, що з БП5 є зведеною ЗБП2 і саме вона ініціює 2 альтернативні продовження процесу з ймовірностями  $P_{uk}$  і  $(1-P_{uk})$ . З першим альтернативним продовженням БП5 ініціює початок процедури відновлення несправної ПАС  $V_2:=0$  і  $V_3:=V_3+1$ . Оскільки сформований стан  $\{V_1 = 1, V_2 = 0, V_3 = 1, V_4 = 2\}$  повторює стан №2, то йому присвоюється такий самий номер. Оскільки інтенсивність БП5 становить  $\lambda_r$ , то інтенсивність переходу визначають за формулою  $\lambda_r P_{uk}$ . Друге альтернативне продовження, зумовлене неуспішним закінченням процедури контролю, призводить до вилучення несправної ПАС з відмовостійкої конфігурації  $V_2:=0$  і  $V_4:=V_4-1$ . Оскільки сформований стан  $\{V_1 = 1, V_2 = 0, V_3 = 0, V_4 = 1\}$  отримано вперше, то йому присвоюється №3. Фіксується перехід із стану 1 у стан 3. Оскільки інтенсивність БП5 становить  $\lambda_r$ , то інтенсивність переходу визначають за формулою  $\lambda_r (1-P_{uk})$ .

Ці і всі подальші результати побудови графу станів на кроках з 4 до 14 наведено в табл. 2.

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

№ кроку	Стан, що розгляд., і актуал. БП	Ймовірності альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи зі стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Початковий стан	--	1	1	0	2	1	--	--
2	1БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	1	2	КВ	1 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
3	1БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_p P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	0	1	3	1 → 3	$\lambda_p (1 - P_{uk})$
4	2БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	2	КВ	2 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
5	2БП4	$P_{uv}$	1	1	1	2	4	2 → 4	$\mu P_{uv}$
		$(1 - P_{uv})$	1	0	1	1	5	2 → 5	$\mu (1 - P_{uv})$
6	3БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	0	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
7	4БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	1	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	2	2	КВ	4 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
8	4БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_p P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	1	1	5	4 → 5	$\lambda_p (1 - P_{uk})$
9	5БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	1	0	КВ	5 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
10	6БП1	$P_{uk}$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
11	6БП4	$P_{uv}$	1	1	2	2	7	6 → 7	$\mu P_{uv}$
		$(1 - P_{uv})$	1	0	2	1	8	6 → 8	$\mu (1 - P_{uv})$
12	7БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
13	7БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_p P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_p (1 - P_{uk})$
14	8БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$

За методикою розроблення опорного графу станів на основі базових подій передбачено перевірку виконання умови про те, що сума ймовірностей альтернативних продовжень процесу має дорівнювати 1. У розробленій моделі після всіх базових подій існує альтернативне продовження процесів, для яких вказану умову виконано.

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

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може відбуватися кожна базова подія, необхідно їх виявити. Для виявлення ситуацій з табл. 2 вибирають усі стани, що утворюються (формується) після БП1 з урахуванням всіх альтернативних продовжень процесу. До цих станів також з табл. 2 вибирають стани, що їм передують. Саме ці попередні стани забезпечують складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких відбувається БП1. Такі дії виконують для всіх наступних базових подій.

Методику складання (формування) формалізованого опису ситуацій для кожної базової події і визначення ФРІП та правил модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) показано нижче на прикладах. Слід зауважити, що для компактного представлення САМ необхідно розглянути можливість об'єднання ситуацій і компонент за такими правилами:

**Правило 1.** Якщо для різних ситуацій ФРІП і ПМКВС є однаковими, то такі ситуації в САМ можна об'єднати. Для цього треба модифікувати формалізований опис ситуації, тобто компоненти

вектора стану, які мають різні значення, записують через оператор OR. Якщо здійснюється переведення САМ від конкретного значення параметра до його символічного позначення, то об'єднання ситуацій можна (треба) проводити після завершення цієї процедури.

Правило 2. Якщо в одній ситуації є однаковими ПМКВС для різних альтернатив, то компоненти САМ для такої ситуації слід об'єднати. Для цього треба ФРІП представити сумою двох формул.

Визначені компоненти структурно-автоматної моделі заносимо до табл. 6: в колонку 1 заносимо базову подію; в колонку 2 – формалізований опис усіх ситуацій, в яких відбувається базова подія; в колонку 3 – ФРІП; в колонку 4 – ПМКВС. Така форма представлення структурно-автоматної моделі відповідає формі діалогового вікна програмного засобу ASNA [9, с. 109–121].

Розробляють структурно-автоматну модель у такій послідовності:

1. **Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП1.** Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП1 і зведені з нею базові події ЗБП2 і ЗБП3, наведено в табл. 3. Це визначення здійснюється на основі графу станів, наведеного в табл. 2.

Таблиця 3

До визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП1

№ кроку	Стан, що розгляд., і актуал. БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи зі стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
<b>Ситуація 1</b>									
1	–	–	1	1	0	2	1	–	–
2	1БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	1	2	КВ	1 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
<b>Ситуація 2</b>									
2	–	–	1	0	1	2	2	–	–
4	2БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	2	КВ	2 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 3</b>									
3	–	–	1	0	0	1	3	–	–
6	3БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	0	0	КВ	3 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 4</b>									
5	–	–	1	1	1	2	4	–	–
7	4БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	1	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	2	2	КВ	4 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
<b>Ситуація 5</b>									
5	–	–	1	0	1	1	5	–	–
9	5БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	1	0	КВ	5 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 6</b>									
7	–	–	1	0	2	2	6	–	–
10	6БП1	$P_{uk}$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 7</b>									
11	–	–	1	1	2	2	7	–	–
12	7БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
<b>Ситуація 8</b>									
11	–	–	1	0	2	1	8	–	–
14	8БП1 (ЗБП2)	$P_{uk}$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$

На основі табл. 3 визначаємо компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП1.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4=2)$ .

Для 1-ої альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} P_{up}$ ; ПМКВС:  $V2:=0; V3:=1$ . Для 2-ої альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ . Для 3-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V3:=1$ .

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4=2)$ .

Для 1-ої альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V3:=2$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ .

Ситуація 3: формалізований опис ситуації 3:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4=1)$ .

Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V3:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=0$ .

Ситуація 4: формалізований опис ситуації 4:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4=2)$ .

Для 1- альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} P_{up}$ ; ПМКВС:  $V2:=0; V3:=2$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ . Для 3-ої альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V3:=2$ .

Ситуація 5: формалізований опис ситуації 5:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4=1)$ .

Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V3:=2$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=0$ .

Ситуація 6: формалізований опис ситуації 6:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=2)$ .

Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ .

У 6-й ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому за правилом 2 компоненти САМ для такої ситуації можна подати у такому об'єднаному вигляді: ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} + \lambda_o(1 - P_{uk}) = \lambda_o$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ .

Ситуація 7: формалізований опис ситуації 7:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=2)$ .

Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} P_{up}$ ; ПМКВС:  $V2:=0; V4:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ . Для 3-ої альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ .

В 7-й ситуації є однаковими ПМКВС для 2-ї та 3-ї альтернатив. Тому за правилом 2 компоненти САМ для такої ситуації можна представити в такому об'єднаному вигляді: Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} P_{up}$ ; ПМКВС:  $V2:=0; V4:=1$ . Для 2 + 3 альтернатив ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk}) + \lambda_o P_{uk}(1 - P_{up}) = \lambda_o(1 - P_{uk} P_{up})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=1$ .

Ситуація 8: формалізований опис ситуації 8:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=1)$ .

Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=0$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_o(1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=0$ .

У 8-й ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому за правилом 2 компоненти САМ для такої ситуації можна подати в такому об'єднаному вигляді: ФРІП:  $\lambda_o P_{uk} + \lambda_o(1 - P_{uk}) = \lambda_o$ ; ПМКВС:  $V1:=0; V4:=0$ .

## 2. Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП4.

Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП4, наведено в табл. 4. Це визначення здійснюється на основі графу станів, наведеного в табл. 2.

Таблиця 4

Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП4

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи зі стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
<b>Ситуація 1</b>									
2	–	–	1	0	1	2	2	–	–
5	2БП4	$P_{uv}$	1	1	1	2	4	$2 \rightarrow 4$	$\mu P_{uv}$
		$(1 - P_{uv})$	1	0	1	1	5	$2 \rightarrow 5$	$\mu(1 - P_{uv})$
<b>Ситуація 2</b>									
7	–	–	1	0	2	2	6	–	–
11	6БП4	$P_{uv}$	1	1	2	2	7	$6 \rightarrow 7$	$\mu P_{uv}$
		$(1 - P_{uv})$	1	0	2	1	8	$6 \rightarrow 8$	$\mu(1 - P_{uv})$

На основі табл. 4 визначаємо компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП4.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4=2)$ . Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\mu P_{uv}$ ; ПМКВС:  $V2:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\mu(1 - P_{uv})$ ; ПМКВС:  $V4:=1$ .

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=2)$ . Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\mu P_{uv}$ ; ПМКВС:  $V2:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\mu(1 - P_{uv})$ ; ПМКВС:  $V4:=1$ .

**3. Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП5.** Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП5, наведено в табл. 5. Це визначення здійснюється на основі графу станів, наведеного в табл. 2.

Таблиця 5

До визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП5

№ кроку	Стан, що розгляд., і актуал. БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи зі стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
<b>Ситуація 1</b>									
1	–	–	1	1	0	2	1	–	–
3	1БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	0	1	3	1 → 3	$\lambda_r (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 2</b>									
5	–	–	1	1	1	2	4	–	–
8	4БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	1	1	5	4 → 5	$\lambda_r (1 - P_{uk})$
<b>Ситуація 3</b>									
11	–	–	1	1	2	2	7	–	–
13	7БП5 (ЗБП2)	$P_{uk}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_r (1 - P_{uk})$

На основі табл. 5 визначаємо компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП5.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4=2)$ . Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V3:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r (1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V4:=1$ .

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4=2)$ . Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V3:=2$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r (1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V4:=1$ .

Ситуація 3: формалізований опис ситуації 3:  $(V1=1) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=2)$ . Для 1-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r P_{uk}$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V4:=1$ . Для 2-ї альтернативи ФРІП:  $\lambda_r (1 - P_{uk})$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V4:=1$ .

У 3-й ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому за правилом 2 компоненти САМ для такої ситуації можна подати у такому об'єднаному вигляді: ФРІП:  $\lambda_r P_{uk} + \lambda_r (1 - P_{uk}) = \lambda_r$ ; ПМКВС:  $V2:=0$ ;  $V4:=1$ .

Результати розроблення компонент структурно-автоматної моделі зведено в табл. 6.

**Заміна конкретних значень параметрів відмовостійкої системи, наведених у САМ, символічними позначеннями.** Оскільки для розроблення САМ відмовостійкої системи крім показників її надійності та ефективності складових враховують і параметри, зміна яких змінює кількість станів графу, то для розроблення графу станів та переходів (тестової моделі) задають їхні мінімальні значення. У цій моделі таким параметром є кількість запланованих відновлень (ремонтів)  $K_v$ . Тому розроблену САМ можна використовувати лише для побудови графу станів з



кількістю відновлень  $K_V = 2$ . Для розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи треба мати можливість змінювати значення цього параметра. Тому у формалізованих описах ситуацій необхідно замінити конкретне значення цього параметра на його символічне представлення. В розробленій САМ така заміна стосується компоненти вектора стану  $V_3$ . При переведенні САМ від конкретного значення до символічного позначення кількості відновлень  $K_V$  для БП1 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 4, і ситуація 3 поглинає (перекриває) ситуацію 5. Тому компоненти САМ, які представляють для БП1 ситуації 4 і 5, необхідно вилучити. Своєю чергою, для БП4 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 2. І тому компоненти САМ, які представляють ситуацію 2 для БП4, необхідно вилучити. І, нарешті, для БП5 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 2. І тому компоненти САМ, які представляють для БП5 ситуацію 2, необхідно вилучити.

Таблиця 6

**Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням,  
кількістю відновлень 2 і з врахуванням ефективності процедур контролю,  
перемикання і відновлення**

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються БП	ФРІП	ПМКВС
1	2	3	4
БП1 ЗБП2 ЗБП3	1) $V_1=1$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=0)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V_2:=0; V_3:=1$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V_1:=0; V_4:=1$
		$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$	$V_1:=0; V_3:=1$
	2) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=1)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V_1:=0; V_3:=2$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V_1:=0; V_4:=1$
	3) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=0)$ AND $(V_4=1)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V_1:=0; V_3:=1$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V_1:=0; V_4:=0$
	4) $(V_1=1)$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=1)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V_2:=0; V_3:=2$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V_1:=0; V_4:=1$
		$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$	$V_1:=0; V_3:=2$
5) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=1)$ AND $(V_4=1)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V_1:=0; V_3:=2$	
	$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V_1:=0; V_4:=0$	
6) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=2)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_o$	$V_1:=0; V_4:=1$	
7) $(V_1=1)$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=2)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V_2:=0; V_4:=1$	
	$\lambda_o (1 - P_{uk} P_{up})$	$V_1:=0; V_4:=1$	
8) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=2)$ AND $(V_4=1)$	$\lambda_o$	$V_1:=0; V_4:=0$	
БП4	1) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=1)$ AND $(V_4=2)$	$\mu P_{uv}$	$V_2:=1$
		$\mu(1 - P_{uv})$	$V_4:=1$
	2) $(V_1=1)$ AND $(V_2=0)$ AND $(V_3=2)$ AND $(V_4=2)$	$\mu P_{uv}$	$V_2:=1$
		$\mu(1 - P_{uv})$	$V_4:=1$
БП5	1) $(V_1=1)$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=0)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_r P_{uk}$	$V_2:=0; V_3:=1$
		$\lambda_r (1 - P_{uk})$	$V_2:=0; V_4:=1$
	2) $(V_1=1)$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=1)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_r P_{uk}$	$V_2:=0; V_3:=2$
		$\lambda_r (1 - P_{uk})$	$V_2:=0; V_4:=1$
	3) $(V_1=1)$ AND $(V_2=1)$ AND $(V_3=2)$ AND $(V_4=2)$	$\lambda_r$	$V_2:=0; V_4:=1$

Структурно-автоматну модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням, довільним значенням кількості відновлень і з врахуванням ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення наведено в табл. 7. Відповідно програмний засіб ASNA [9, с. 109–121] з цією моделлю дає змогу будувати необхідну кількість графів станів і переходів для розв'язання задачі надійнісного синтезу. Для відмовостійкої системи з кількістю відновлень 20 граф має 63 стани та 205 переходів, і його побудова триває 6 секунд.

**Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням,  
з довільним значенням кількості відновлень і з врахуванням  
ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення**

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються БП	ФРІП	ПМКВС
1	2	3	4
БП1 ЗБП2 ЗБП3	1) $V1=1$ AND $(V2=1)$ AND $(V3 < K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V2:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V1:=0; V4:=1$
		$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$	$V1:=0; V3:=V3+1$
	2) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(0 < V3 < K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V1:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V1:=0; V4:=1$
	3) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(V3 < K_V)$ AND $(V4=1)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V1:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_o (1 - P_{uk})$	$V1:=0; V4:=0$
	6) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(V3=K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o$	$V1:=0; V4:=1$
7) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3=K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V2:=0; V4:=1$	
	$\lambda_o (1 - P_{uk} P_{up})$	$V1:=0; V4:=1$	
8) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(V3=K_V)$ AND $(V4=1)$	$\lambda_o$	$V1:=0; V4:=0$	
БП4	1) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(0 < V3 \leq K_V)$ AND $(V4=2)$	$\mu P_{uv}$	$V2:=1$
		$\mu(1 - P_{uv})$	$V4:=1$
БП5	1) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3 < K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_r P_{uk}$	$V2:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_r (1 - P_{uk})$	$V2:=0; V4:=1$
	3) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3=K_V)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_r$	$V2:=0; V4:=1$

Будують граф станів на основі структурно-автоматної моделі за алгоритмом, описаним в [6, с. 79–92].

**Дослідження можливостей розробленої моделі відмовостійкої системи  
з однократним резервуванням і з відновленням**

**Результати розрахунків показників надійності відмовостійкої системи на її надійнісній моделі** (надалі “модель 3”), ступінь адекватності якої піднято за допомогою запропонованої методики, і порівняння їх з результатами, які отримують розробники (проектанти) на відомих спрощених моделях.

У практиці надійнісного проектування відмовостійкої системи, що розглядається, розробники мають можливість використовувати такі моделі: модель 1: кількість відновлень необмежена; модель 2: кількість відновлень обмежена. В моделях 1 і 2 фактично закладено ідеалізовані значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення:  $P_{uk} = 1$ ,  $P_{up} = 1$ ,  $P_{uv} = 1$ .

У відмовостійкій системі буде використано ПАС з інтенсивністю відмов  $\lambda_o = \lambda_r = 5e-4$  1/год. Тривалість процедури відновлення 1 година. На весь час експлуатації (20000 годин) заплановано 20 відновлень. Для моделі 3 ймовірності успішного контролю, перемикання і відновлення задані однаковими значеннями: 0,9; 0,99; 0,999. Результати розрахунків наведено на рис. 1 залежностями ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням від тривалості її експлуатації. В табл. 8 наведено значення ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації до 20000 годин  $P_{б,р}$  (20000) і середнє значення тривалості безвідмовної роботи  $T_{б,р}$ .

Отримані результати підтверджують доцільність підвищення ступеня адекватності надійнісних моделей відмовостійких систем врахуванням показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення.

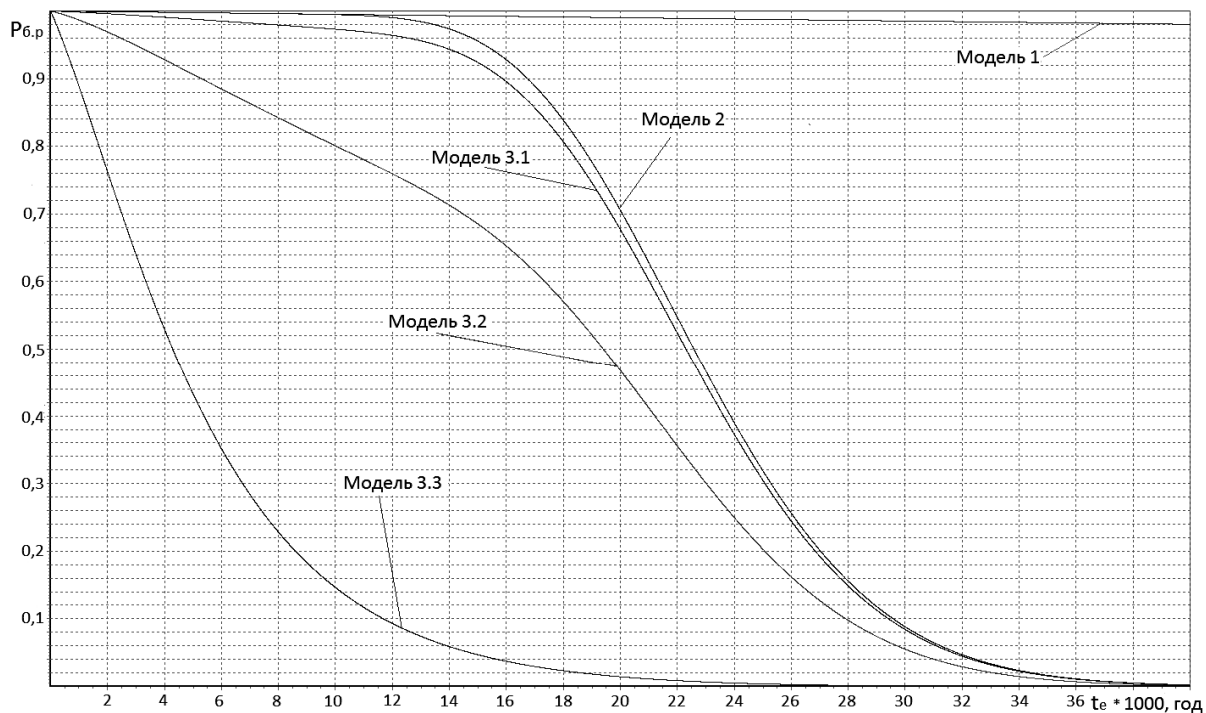


Рис. 1. Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням від тривалості її експлуатації, отримані за допомогою трьох моделей з різним ступенем адекватності

Таблиця 8

**Показники надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням, отримані за моделями різного ступеня адекватності**

Дані про відмовостійку систему	Модель 1	Модель 2	Модель 3		
			результат 3.1	результат 3.2	результат 3.3
$\lambda_o$ , 1/год	5e-4	5e-4	5e-4		
$\lambda_r$ , 1/год	5e-4	5e-4	5e-4		
$t_v$ , год	1	1	1		
$K_V$	–	20	20		
$P_{uk}$	–	–	0,999	0,99	0,9
$P_{up}$	–	–	0,999	0,99	0,9
$P_{uv}$	–	–	0,999	0,99	0,9
<b><math>P_{б,р}(20000)</math></b>	<b>0,9905</b>	<b>0,7055</b>	<b>0,677</b>	<b>0,4675</b>	<b>0,0143</b>
<b><math>T_{б,р}</math>, год</b>	<b>1974246</b>	<b>22895</b>	<b>22340</b>	<b>18122</b>	<b>5494</b>

**Розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи з однократним резервуванням і обмеженою кількістю відновлень через багатоваріантний аналіз.**

Постановка задачі. Відмовостійка система з однократним резервуванням і з обмеженим відновленням має забезпечувати ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи за тривалості її експлуатації  $t_e = 20000$  годин  $P_{б,р}(t_e) = 0,95$ . Задача надійнісного синтезу передбачає визначення мінімальних вимог до показників надійності ПАС і до показників ефективності процедур контролю, перемикавання і відновлення. При розв'язанні такої задачі значення частини показників можуть бути зумовленими.

Варіант 1: Якщо ПАС купують у готовому вигляді, значення інтенсивності їх відмов є заданим (не підлягає зміні). Тривалість процедури відновлення також може бути зумовленою.

Тобто зумовленим є мінімальне значення тривалості процедури відновлення. Така умова пов'язана з тим, що об'єкти, на яких експлуатуються ПАС, розосереджені на певній території, і ремонтник має добратися від місця дислокації до об'єкта, на якому є несправна ПАС. Тривалість відновлення містить затрати часу на дорогу і затрати часу на діагностику і заміну (ремонт) несправної ПАС. Тривалість відновлення також враховує (може враховувати) і кваліфікацію ремонтника.

Визначенню підлягають значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення та кількість запланованих відновлень.

Вважаємо, що для куплених ПАС показник надійності "інтенсивність відмов"  $\lambda_o = 1e-4$  1/год. Ремонтна служба має забезпечувати відновлення працездатності несправної ПАС за 1 годину. Розв'язок задачі синтезу відмовостійкої системи наведено на рис. 2 і в табл. 9. На рис. 2 цифри відповідають номеру кроку в послідовності визначення заданого значення ймовірності безвідмовної роботи  $P_{б,р}(20000) = 0,95$ , які виконано в табл. 9.

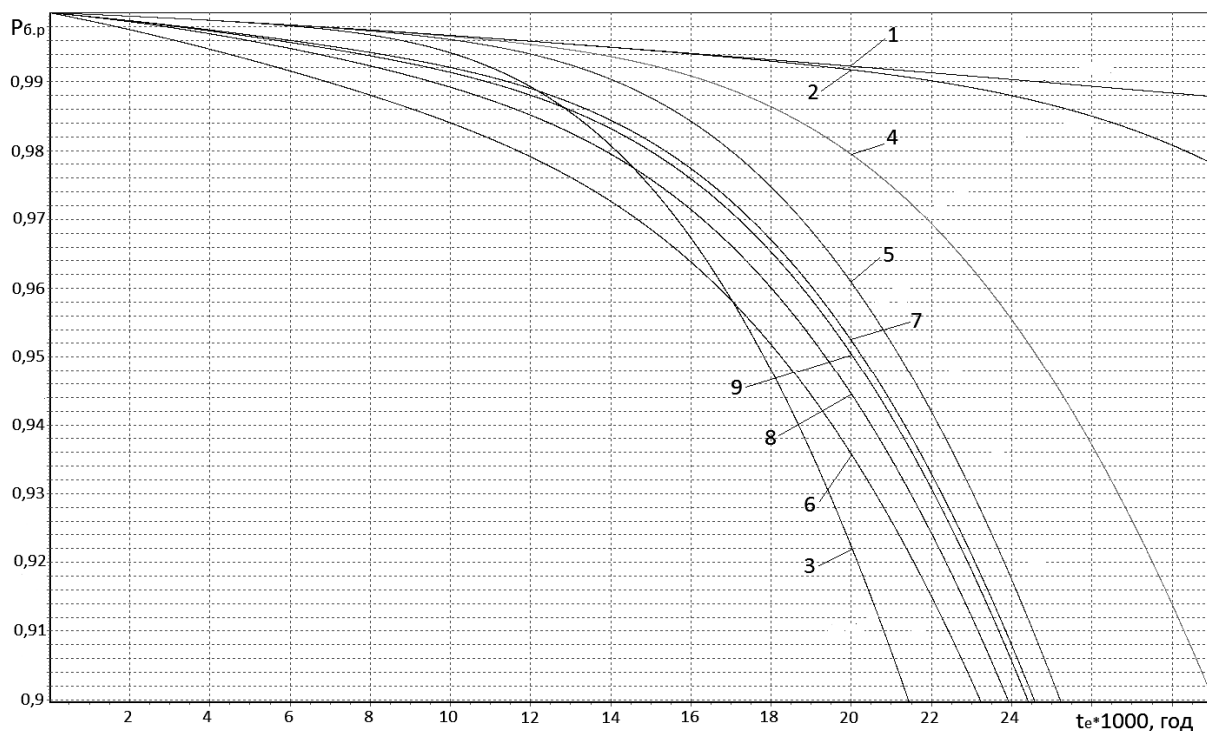


Рис. 2. Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням від тривалості її експлуатації, отриманих в процесі розв'язання задачі надійнісного синтезу

Таблиця 9

**Послідовність кроків розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи**

Крок №	$P_{ук}$	$P_{уп}$	$P_{ув}$	$K_V$	$P_{б,р}(20000)$
1	0,999	0,999	0,999	20	0,9928
2	0,999	0,999	0,999	10	0,9923
3	0,999	0,999	0,999	5	0,9223
4	0,999	0,999	0,999	7	0,9794
5	0,999	0,999	0,999	6	0,9608
6	0,99	0,999	0,999	6	0,9355
7	0,996	0,999	0,999	6	0,9524
8	0,996	0,999	0,995	6	0,9444
9	0,996	0,999	0,998	6	0,9503

У результаті розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням, яка має забезпечувати ймовірність безвідмовної роботи  $P_{б,р}(t_e) = 0,95$  за тривалості її експлуатації  $t_e = 20000$  годин, вимоги до процедур контролю, перемикання і відновлення мають бути такими:  $P_{ук} = 0,996$ ,  $P_{уп} = 0,999$ ,  $P_{ув} = 0,998$ ,  $K_V = 6$ .

Варіант 2. За цим варіантом вважаємо зумовленими прийнятні для розробника значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення та мінімальне значення тривалості процедури відновлення. Визначають значення показників надійності ПАС  $\lambda_o$  і  $\lambda_r$  та уточнюють значення кількості запланованих відновлень  $K_V$  і значення тривалості відновлення.

Для розробника є прийнятними такі вимоги для реалізації процедур контролю, перемикання і відновлення  $P_{ук\ min} = P_{уп\ min} = P_{ув\ min} = 0,99$ . Ремонтна служба має забезпечувати відновлення працездатності несправної ПАС за 1 годину і передбачено 2 відновлення на інтервалі часу експлуатації  $t_e = 20000$  годин. У результаті розв'язання задачі надійнісного синтезу для заданих вхідних даних з виконанням вимоги, що  $P_{б,р}(t_e) = 0,95$ , значення інтенсивності відмов основної і резервної (резерв гарячий) ПАС має дорівнювати  $3,58e-5$  1/год.

Для ПАС з такою надійністю досліджено чутливість показника надійності відмовостійкої системи до зміни кількості відновлень і до збільшення тривалості відновлення. Зменшення і збільшення кількості відновлень призводить до таких змін значення показника надійності відмовостійкої системи: при  $K_V = 1$  значення  $P_{б,р}(t_e) = 0,8844$ , а при  $K_V = 3$  значення  $P_{б,р}(t_e) = 0,9725$ . Отже, кількість відновлень корегувати не потрібно. Розглянемо можливість збільшити норматив часу на відновлення. Якщо відновлення триватиме 10 годин, то  $P_{б,р}(t_e) = 0,9498$ , якщо 20 годин, то  $P_{б,р}(t_e) = 0,9493$ , якщо 50 годин, то  $P_{б,р}(t_e) = 0,9482$ . Проведені дослідження дають змогу дати такі рекомендації до процедури відновлення: для відмовостійкої системи з інтенсивністю відмов основної і резервної (резерв гарячий) ПАС  $3,58e-5$  1/год на інтервалі експлуатації 20000 годин необхідно передбачити 2 відновлення; тривалість відновлення не має (не може) перевищувати 10 годин.

Прийнятність значень показників, отриманих після розв'язання задачі надійнісного синтезу, необхідно погоджувати з розробником (проектантом) відмовостійкої системи.

### Висновки

Наведено методику розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після закінчення процедур контролю, перемикання і відновлення, яка забезпечує безпомилкову їх побудову і в якій трудомісткі процедури піддаються автоматизації. Це дасть змогу зменшити витрати часу на розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких систем і відповідно на розв'язання задач їх системного аналізу та синтезу. Інтелектуальну складову процесу розроблення структурно-автоматних моделей залучають до розроблення тестової моделі у вигляді графу станів і до заміни конкретних значень параметрів відмовостійкої системи символічними позначеннями.

Подальше підвищення ступеня адекватності структурно-автоматних моделей відмовостійких систем і відповідне підвищення достовірності показників їх надійності можливе з використанням методу фаз Ерланга згідно з методикою, наведеною в статті [10].

Для продовження цієї роботи поставлена задача розроблення алгоритму програми і програмного модуля для комп'ютерної підтримки процесу розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем.

1. Program complex Windchill Quality Solutions (formerly Relex). Available at: <http://www.crimsonquality.com/products/markov/>. (accessed 28.03.2016).
2. Program complex ITEM Software. Available at: <http://www.itemuk.com/markov.html>. (accessed 28.03.2016).
3. Program complex RAM Commander - Markov Chains Module. Available at: <http://www.sohar.com/downloads/download-reliability-and-safety-software.html>. (accessed 28.03.2016).
4. Program complex ISOGRAPH. Available at: <http://www.isograph.com/software/reliability-workbench/markov-analysis/> (accessed 31.03.2016).
5. Федасюк, Д. В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем [Текст] / Д. В. Федасюк, С. Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. - Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2016. - № 6 (80). - С. 24-34.
6. Волочій Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [Текст] / Б. Ю. Волочій. - Львів: Вид-во Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. - 220 с.
7. 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.
8. Яковина В. С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем [Текст] / В. С. Яковина, С. Б. Волочій // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2012): Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції. - Львів, 2012. - С. 234-237.
9. Волочій Б. Ю. Системотехнічне проектування телекомунікаційних мереж. Практикум: навчальний посібник / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. - 128 с.
10. Федасюк Д. В. Структурно-автоматна модель відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга [Текст] / Д. В. Федасюк, С. Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. - Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2016. - № 3 (77). - С. 78-92.