

Т. О. Стефанович\*, С. В. Щербовських\*\*

Національний університет “Львівська політехніка”,

\*кафедра проектування та експлуатації машин,

\*\*кафедра систем автоматизованого проектування

## ВРАХУВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО РОДУ ПЕРЕМИКАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМИ ІЗ ДВОКРАТНИМ ГАРЯЧИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

© Стефанович Т. О., Щербовських С. В., 2017

Запропонована модель надійності системи із двократним гарячим резервуванням та неідеальними перемикальними пристроями, яка призначена для визначення ймовірності її безвідмовної роботи. Особливість моделі полягає у тому, що у ній враховані помилки першого та другого роду для перемикальних пристроїв. Для визначення ймовірнісних характеристик системи використано динамічне дерево відмов та марковську модель.

*Ключові слова: модель надійності, динамічне дерево відмов, марковська модель, гаряче резервування, перемикальний пристрій.*

## TAKING INTO ACCOUNT TYPE I AND II ERRORS OF SWITCHING DEVICE FOR SYSTEM WITH DOUBLE HOT REDUNDANCY

The reliability model of the system with double hot redundancy and nonideal switching devices is suggested. The model is designed for the reliability characteristics determination. The peculiarity of the model is that it takes into account errors of the first and the second type for switching devices. Dynamic fault tree and Markov model are used for determining probability characteristics.

*Key words: reliability model, dynamical fault tree, Markov model, hot redundancy, switching device.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Одним із способів підвищення надійності технічних систем є застосування структурного резервування. Зміст такого резервування полягає у тому, що у структуру системи вводять надлишкові елементи. Такі резервні елементи у разі відмови основних елементів системи після відповідного перемикання виконують їхні функції. Найвживанішим типом структурного резервування є гаряче резервування. Для такого типу резервування надлишкові елементи, незалежно від стану інших елементів системи та стану перемикального пристрою, весь час перебувають у навантаженому режимі. Перемикальний пристрій підключає резервні елементи, якщо основні втратили працездатність. Під час аналізу надійності таких систем одним із важливих факторів є врахування впливу перемикальних пристроїв на показники надійності системи. Цей вплив виявляється у появі помилок першого і другого роду. Під помилкою першого роду розуміємо хибне спрацювання перемикального пристрою. Це означає, що основний елемент працездатний, але перемикальний пристрій вирішив, що цей елемент непрацездатний, і підключив резервний елемент. Під помилкою другого роду розуміємо пропуск моменту спрацювання перемикальним пристроєм. Це означає, що основний елемент відмовив, але перемикальний пристрій вирішив, що цей елемент працездатний, і не підключив резервний елемент. Обидві помилки знижують надійність системи та спричиняють недовикористання її ресурсу.

Робота розглядає проблему формалізації та аналізу впливу похибок першого та другого роду перемикального пристрою на надійність систем із двократним гарячим резервуванням. Ця проблема

актуальна під час проектування та експлуатації механічних та електротехнічних систем відповідального призначення.

**Аналіз останніх досліджень.** Для вирішення поставленої проблеми у літературі запропоновані два основні підходи. Перший підхід, який подано у [1, 2], ґрунтується на застосуванні логіко-ймовірнісного методу. Згідно із цим підходом, у структуру системи, а саме – послідовно до резервних елементів вводять умовний елемент, який відповідає перемикальному пристрою. До різновиду цього підходу потрібно також зарахувати метод, який ґрунтується на спрощених емпіричних формулах, описано у [3]. Недолік підходу полягає у тому, що помилка першого роду у такий спосіб не може бути врахована, а помилка другого роду врахована у першому наближенні. Зокрема, не врахований ефект, що після переключення перемикального пристрою з основних елементів на резервні непрацездатність перемикального пристрою не впливає на систему.

Другий підхід ґрунтується на побудові графа станів та переходів системи і подальшому його аналізі на основі марковської моделі або методу Монте-Карло. У межах цього підходу виділяємо кілька способів його застосування. Для простих систем таку побудову можна здійснити вручну, як це показано у [4]. У [5–8] побудову графа станів та переходів систем такого типу можна здійснити на основі технології моделювання систем із елементами, які перебувають у двох та більше станах. У [9–12] для розв’язання цієї задачі пропонується застосувати багатотермінальне динамічне дерево відмов. У цьому дослідженні пропонується застосувати вказаний підхід до системи із багатократним гарячим резервуванням.

#### У цій роботі розв’язано такі завдання:

- математично описано надійність системи із двократним гарячим резервуванням та перемикальними пристроями на основі багатотермінального динамічного дерева відмов;
- побудовано граф станів і переходів досліджуваної системи;
- проаналізовано вплив помилок першого і другого роду перемикальних пристроїв на характеристики надійності системи.

#### Визначення характеристик надійності системи.

##### Опис системи

До складу досліджуваної системи входять однакові джерела енергії G1, G2 та G3 і перемикальні пристрої S1 та S2. Пристрій S1 здійснює перемикання між джерелами G1 та G2, а пристрій S2 – між виходом перемикального пристрою S1 та джерелом енергії G3 (рис. 1).

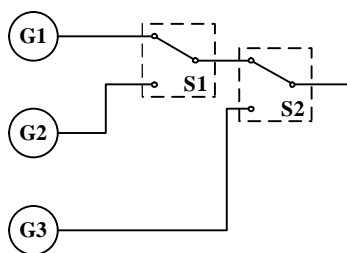


Рис. 1. Структурна схема системи

Система призначена для живлення споживача енергією, який підключений до виходу перемикального пристрою S2. Система є працездатною, якщо хоча б одне працездатне джерело з’єднане зі споживачем. Розглянемо принцип функціонування системи за умови, що вона невідновлювана і перемикальні пристрої не можуть повернутись у початковий стан. Вважаємо, що у початковому стані усі джерела працездатні та навантажені. Пристрої S1 та S2 підключають споживача до джерела G1, а джерела G2 та G3 у цей час перебувають у гарячому резерві. Після відмови джерела G1 пристрій S1 перемикається та підключає споживача до джерела G2. Після відмови джерела G2 пристрій S2 перемикається та підключає споживача до джерела G3. Після відмови джерела G3 система переходить у непрацездатний стан.

Якщо пристрій S1 допускає помилку першого роду, то він замість працездатного джерела G1 підключає джерело G2. Якщо пристрій S1 допускає помилку другого роду, то він не підключає

джерело G2 замість непрацездатного джерела G1. Якщо пристрій S2 допускає помилку першого роду, то він замість виходу перемикального пристрою S1, до якого під'єднане працездатне джерело G1 або G2, підключає джерело G3. Якщо пристрій S2 допускає помилку другого роду, то він не підключає джерело G3 замість виходу перемикального пристрою S2, до якого підключені непрацездатні джерела G1 та G2.

### Дерево відмов системи

На першому етапі побудуємо дерево відмов системи, враховуючи припущення, що перемикальні пристрої є ідеальними, тобто спрацьовують миттєво і не допускають помилок. На другому етапі розглянемо особливості побудови дерева відмов із урахуванням цих помилок.

Непрацездатність системи з ідеальними перемикальними пристроями позначимо блоком “Вершина подій 1” (рис. 2, а). Така непрацездатність виникає, якщо відсутнє живлення на виході пристрою S1 та джерело G3 непрацездатне, що описано блоком “Оператор 1”, тип якого задано логічною операцією І. Живлення на виході пристрою S1 відсутнє, якщо джерела G1 і G2 непрацездатні, що описано блоком “Оператор 2”, тип якого заданий логічною операцією І. Непрацездатність джерел G1, G2 та G3 позначено блоками “Базова подія 1”, “Базова подія 2” та “Базова подія 3”. Напрацювання до відмови джерел G1, G2 та G3 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , та  $\lambda_3$ .

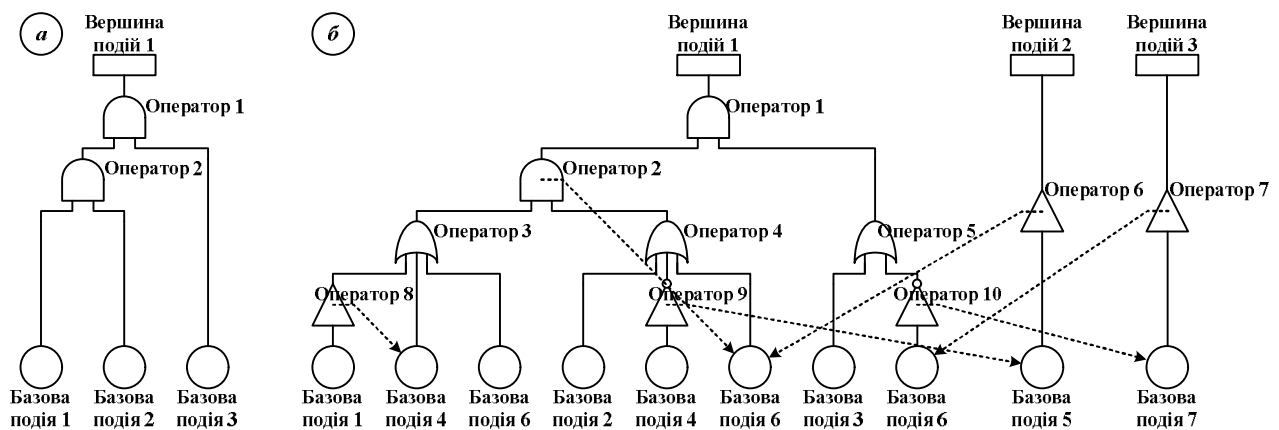


Рис. 2. Дерево відмов системи: а – із ідеальними перемикальними пристроями; б – із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв

Для описання непрацездатності системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв у моделі потрібно врахувати два явища, а саме: самовільне перемикання контактів і напрацювання до відмови системи керування перемикальних пристроїв. Для врахування напрацювання системи керування перемикальних пристроїв у дерево відмов додано блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” (рис. 2, б), тобто дерево відмов є багатотермінальним [12]. Блок “Вершина подій 2” позначає непрацездатність системи керування пристроєм S1, а блок “Вершина подій 3” позначає непрацездатність системи керування пристроєм S2. Оскільки система керування перемикальним пристроєм, з погляду надійності, є одноелементною, тому блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” за змістом відповідають блокам “Базова подія 5” та “Базова подія 7”. Напрацювання до відмови систем керування пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_5$ , та  $\lambda_7$ .

Для врахування самовільного перемикання контактів пристроїв у дерево відмов додано блоки “Базова подія 4” та “Базова подія 6”. Блок “Базова подія 4” вказує на стан контактів пристрою S1, зокрема, підключення джерела G1 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення джерела G2 – положенням ІСТИННО. Блок “Базова подія 6” вказує на стан контактів пристрою S2, зокрема, підключення виходу перемикального пристрою S1 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення

джерела G3 – положенням ІСТИННО. Ймовірність самовільного перемикавання контактів пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_4$  та  $\lambda_6$ .

Непрацездатність системи внаслідок відсутності живлення від джерела G1 виникає, якщо це джерело непрацездатне, або хоча б один із контактів перемикальних пристроїв S1 чи S2 знаходиться у положенні ІСТИННО. Це описано блоком “Оператор 3”, тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність системи внаслідок відсутності живлення від джерела G2 виникає, якщо це джерело непрацездатне, або контакт перемикального пристрою S1 знаходиться у положенні ХИБНО, або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні ІСТИННО. Це описано блоком “Оператор 4”, тип якого задано логічною операцією АБО. Непрацездатність системи внаслідок відсутності живлення від джерела G3 виникає, якщо це джерело непрацездатне або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні ХИБНО. Це описано блоком “Оператор 5”, тип якого задано логічною операцією АБО. Для інверсії сигналів від блоків “Базова подія 4” та “Базова подія 6” застосовано блоки “Оператор 9” і “Оператор 10”, тип яких задано логічною операцією НІ.

У системі відбувається шість динамічних явищ, які полягають у зміні інтенсивності напрацювання елементів та інтенсивності перемикавання контактів залежно від стану інших елементів. Перше динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикавання пристрою S1 залежно від стану джерела G1. Для його описання додаємо у дерево відмов блок “Оператор 8”, у якому задаємо логічні умови. Якщо джерело G1 працездатне, то інтенсивність перемикавання пристрою S1 дорівнює  $\lambda_4$ . У цьому випадку процес самовільного перемикавання є джерелом помилки першого роду. Якщо джерело G1 непрацездатне, то інтенсивність перемикавання пристрою S1 збільшуємо у  $k_1$  разів. У цьому випадку процес перемикавання забезпечує вихід системи із непрацездатного стану.

Друге динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикавання пристрою S2 залежно від стану джерел G1 та G2 та положення контактів пристроїв S1 та S2. Для його описання у блоці “Оператор 2” задаємо логічні умови. Якщо на виході перемикального пристрою S1 є живлення, то інтенсивність перемикавання пристрою S2 дорівнює  $\lambda_6$ . У цьому випадку процес самовільного перемикавання є джерелом помилки першого роду. Якщо живлення відсутнє, то інтенсивність перемикавання пристрою S2 збільшуємо у  $k_2$  разів. У цьому випадку процес перемикавання забезпечує вихід системи із непрацездатного стану.

Третє динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристрою S1 залежно від стану його контактів. Для описання цього явища у блоці “Оператор 9” задаємо логічні умови. Якщо контакти пристрою S1 перебувають у положенні ХИБНО, то інтенсивність напрацювання системи керування цього пристрою дорівнює  $\lambda_4$ . Якщо контакти перебувають у положенні ІСТИННО, то інтенсивність напрацювання встановлюємо такою, що дорівнює нулю. Введення цього явища у модель спрошує подальші розрахунки.

Четверте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикавання пристрою S1 залежно від стану його системи керування. Для описання цього явища додаємо у дерево відмов блок “Оператор 6”, у якому задаємо логічні умови. Якщо система керування пристрою S1 працездатна, то інтенсивність перемикавання його контактів дорівнює  $\lambda_4$ . Якщо система керування непрацездатна, то інтенсивність перемикавання встановлюємо такою, що дорівнює нулю. Після відмови джерела G1 контакти не зможуть перемкнутись, що спричинить помилку другого роду.

П’яте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристрою S2 залежно від стану його контактів. У дереві відмов воно описано аналогічно до третього динамічного явища із застосуванням блока “Оператор 10”.

Шосте динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикавання пристрою S2 залежно від стану його системи керування. У дереві відмов воно описано аналогічно до четвертого динамічного явища із застосуванням блока “Оператор 7”.

### Граф станів та переходів системи

На підставі поданих вище дерев відмов побудовано графи станів та переходів для системи із ідеальними перемикальними пристроями (рис. 3, а) та для системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв (рис. 3, б). На рис. 3 працездатні стани зафарбовані білим кольором, а непрацездатні – сірим. Коло 1 (рис. 3, в) відображає стан системи за наявності живлення споживача; коло 2 (рис. 3, в) – стан системи керування перемикальним пристроєм S1; коло 3 (рис. 3, в) – стан системи керування пристроєм S2. Суцільна дуга 4 відображає відмову джерел G1, G2 та G3; штрихова дуга 5 – перемикання контакту пристроїв S1 та S2; пунктирна дуга 6 – відмову системи керування пристроїв S1 та S2. Граф для першої системи (рис. 3, а) містить 8 станів, із яких 1 є поглинальний і 12 переходів. Граф для другої системи (рис. 3, б) містить 72 стани, із яких 4 поглинальні і 200 переходів.

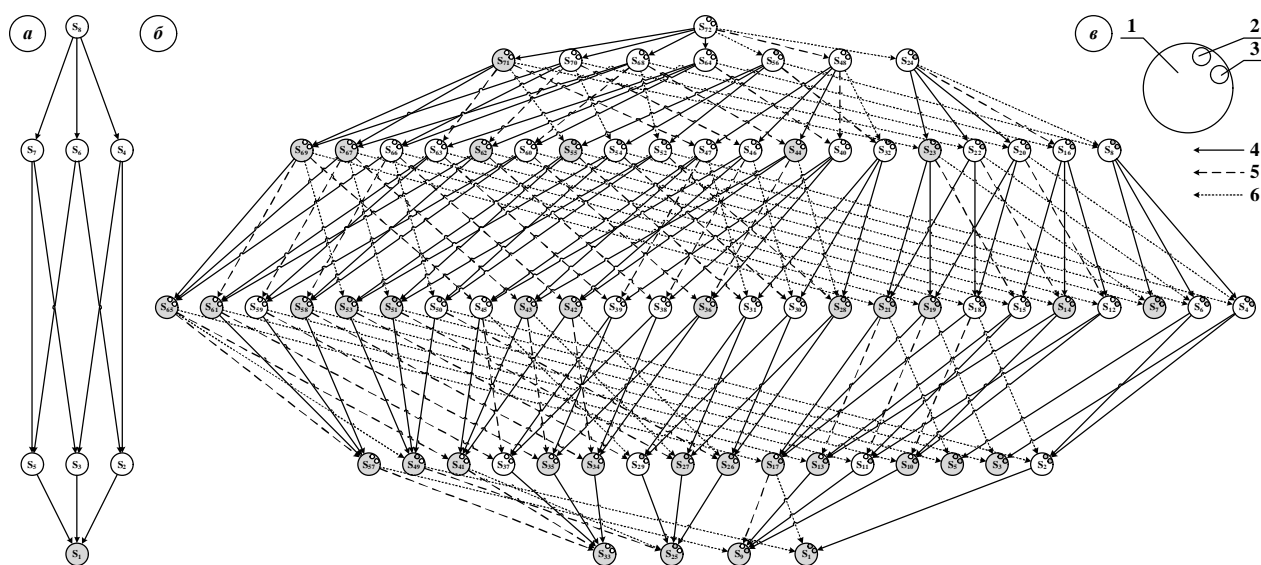


Рис. 3. Граф станів та переходів системи:

а – із ідеальними перемикальними пристроями; б – із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв; в – умовні позначення

**Аналіз впливу помилок першого та другого роду на ймовірність безвідмовної роботи системи.** Ґрунтуючись на графах станів та переходів системи побудовано однорідні марковські моделі, застосовуючи які, обчислено сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи. Під час аналізу впливу помилок першого та другого роду важливим є не абсолютне значення кожного із параметрів, а співвідношення параметрів джерел із параметрами перемикальних пристроїв, тому доцільно виконувати обчислення у відносних одиницях. За базову величину приймаємо інтенсивність відмов джерела G1  $\lambda_1 = 1$ . Оскільки джерела G1, G2 та G3 є однаковими, тому  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ . Приймаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикання першого пристрою S1  $\lambda_4$  до середньої тривалості перемикання у номінальному режимі роботи становить  $k_1 = 100\,000$ . Значення цього відношення обернено пропорційне до інерційності спрацювання перемикального пристрою і у граничному випадку має прямувати до нескінченності. Перемикальний пристрій S2 у номінальному режимі роботи має бути інерційнішим, ніж пристрій S1. Це пов'язано із тим, що у момент перемикання пристрою S1 на його виході зникає живлення, що сприймається системою керування пристрою S2 як команда на його перемикання. Тому менша інерційність пристрою S1 зменшує ймовірність помилки першого роду. Приймаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикання другого пристрою S2  $\lambda_6$  до середньої тривалості перемикання у номінальному режимі роботи становить  $k_2 = 10\,000$ . Оскільки перемикальні пристрої є однаковими, тому  $\lambda_4 = \lambda_6$  та  $\lambda_5 = \lambda_7$ .

На рис. 4, а показано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів  $\lambda_4 = \lambda_6$ , які відповідають помилці першого роду, за умови  $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $\lambda_4 = \lambda_6 = 0$ ; крива 2 –  $\lambda_4 = \lambda_6 = 0,1$ ; крива 3 –  $\lambda_4 = \lambda_6 = 0,5$ ; крива 4 –  $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$ ; крива 5 –  $\lambda_4 = \lambda_6 = 2$ ; крива 6 –  $\lambda_4 = \lambda_6 = 10$  та крива 7 –  $\lambda_3 = \infty$ .

На рис. 4, б показано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів  $\lambda_5 = \lambda_7$ , які відповідають помилці другого роду, за умови, що  $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $\lambda_5 = \lambda_7 = 0$ ; крива 2 –  $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$ ; крива 3 –  $\lambda_5 = \lambda_7 = 2$ , крива 4 –  $\lambda_5 = \lambda_7 = 10$  та крива 5 –  $\lambda_5 = \lambda_7 = \infty$ .

На рис. 4, в показано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень відношення  $k_1/k_2$ , які відповідають інерційності перемикальних пристроїв, за умови, що  $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$  та  $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $k_1/k_2 = 100$ ,  $k_1/k_2 = 10$  та  $k_1/k_2 = 0,1$ .

З метою порівняння результатів, крива 4 на рис. 4, а, крива 2 на рис. 4, б та крива 2 на рис. 4, в, яка накреслена потовщеною лінією, є однією і тією самою характеристикою, що відповідає умові  $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$ ,  $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$  та  $k_1/k_2 = 10$ . Параметри  $\lambda_4 = \lambda_6$  та  $\lambda_5 = \lambda_7$  можуть набувати значень у діапазоні від 0 до  $\infty$ , де значення 0 відповідає відсутності впливу помилки, а значення  $\infty$  – абсолютному впливу цієї помилки. Як бачимо із рис. 4, за покрокового збільшення значень параметрів  $\lambda_4 = \lambda_6$  та  $\lambda_5 = \lambda_7$  імовірність безвідмовної роботи системи має тенденцію до зниження.

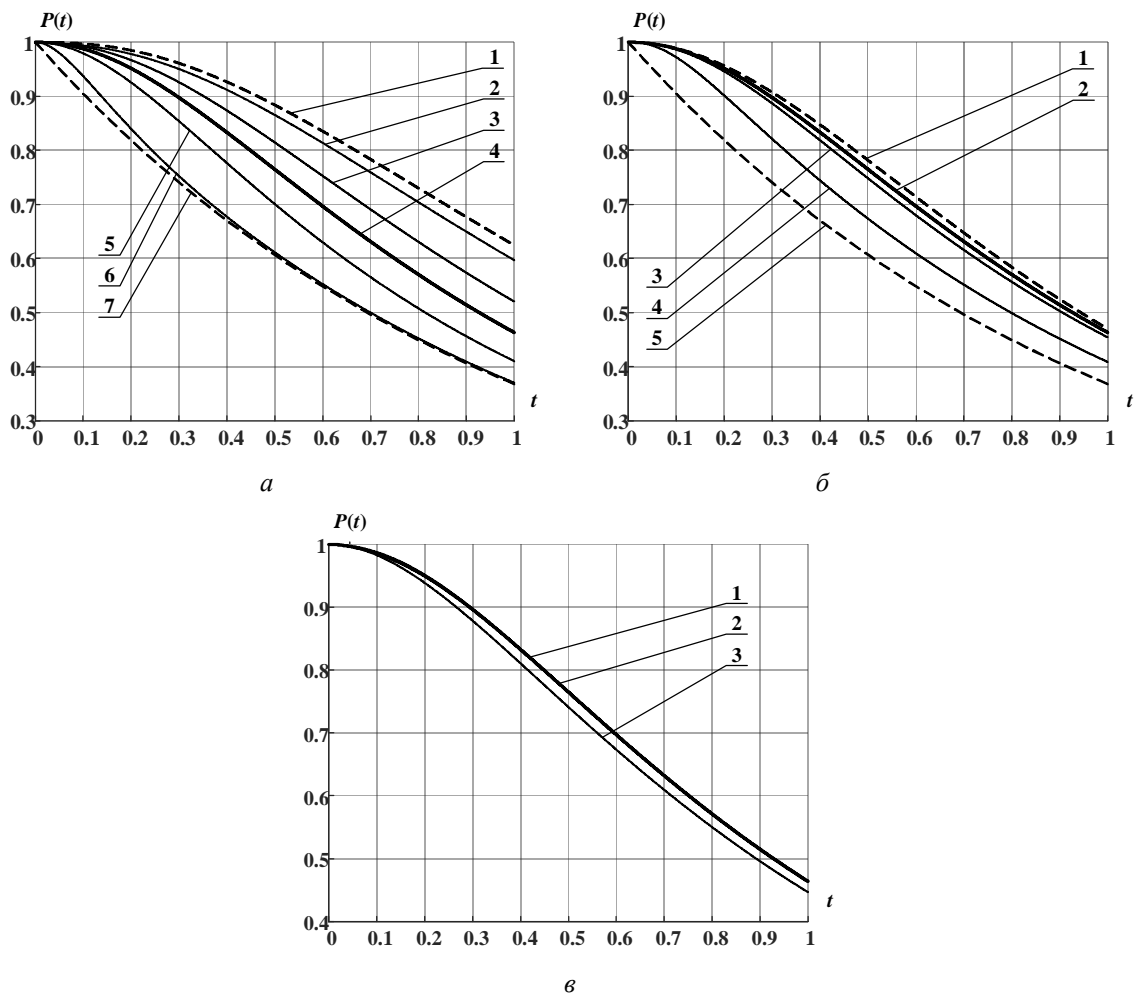


Рис. 4. Сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи, які показують вплив помилки перемикального пристрою: а – першого роду; б – другого роду; в – спричиненої інерційністю контактів

**Висновки.** У роботі розроблено математичну модель надійності, яка враховує помилки першого та другого роду перемикального пристрою для системи із двократним гарячим резервуванням та призначена для визначення ймовірності безвідмовної роботи. Надійність системи математично описана багатотермінальним динамічним деревом відмов, у якому задано логічні умови взаємного впливу елементів системи та перемикальних пристроїв. Ймовірнісні характеристики системи визначені за марковською моделлю, яка сформована на основі дерева відмов. За допомогою марковської моделі проаналізовано, як впливають помилки першого та другого роду перемикальних пристроїв на ймовірнісні характеристики досліджуваної системи. Кількісно показано, як за збільшення інтенсивності самовільного перемикавання контактів та інтенсивності відмов системи керування пристрою зменшується ймовірність безвідмовної роботи системи. Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності системи із двократним заміщувальним резервуванням, яка враховуватиме вплив помилок першого та другого роду перемикального пристрою.

1. Дружинин Г. В. *Надежность автоматизированных систем* / Г. В. Дружинин. – М.: “ЭНЕРГИЯ”, 1977. – 536 с. 2. Mostafa Abouei Ardakan. *Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems* / Mostafa Abouei Ardakan, Ali Zeinal Hamadani // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2014. – Vol. 130. – P. 132–139. 3. Ушаков И. А. *Курс теории надежности систем: учеб. пособ.* / И. А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с. 3. Богатырев В. А. *Надежность дублированных вычислительных комплексов* / В. А. Богатырев, С. А. Башкова, В. Ф. Беззубов, А. В. Полякова, Е. Ю. Котельникова, И. Ю. Голубев // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. – 2011. – № 6 (76). – С. 76–80. 4. Волочий Б. Ю. *Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем* / Б. Ю. Волочий. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2004. – 219 с. 5. Daniya Zamalieva. *A probabilistic model for online scenario labeling in dynamic event tree generation* / Daniya Zamalieva, Alper Yilmaz, Tunc Aldemir // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2013. – Vol. 120. – P. 18–26. 6. Daniya Zamalieva. *Online scenario labeling using a hidden Markov model for assessment of nuclear plant state* / Daniya Zamalieva, Alper Yilmaz, Tunc Aldemir // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2013. – Vol. 110. – P. 1–13. 7. Manno G. *Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism* / G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D’Urso, N. Trapani // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2014. – Vol. 121. – P. 250–262. 8. Daniele Codetta-Raiteri. *Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees’ modeling power* / Daniele Codetta-Raiteri // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – Vol. 96, No 5. – P. 534–544. 9. Москвіна І. І. *Врахування помилок першого та другого роду перемикального пристрою для системи із гарячим резервуванням* / І. І. Москвіна, Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2015. – Т. 5, № 2(25). – С. 54–59. 10. Москвіна І. І. *Врахування помилок першого та другого роду перемикального пристрою для системи із холодним резервуванням* / І. І. Москвіна, Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських // *Радіоелектронні і комп’ютерні системи*. – 2016. – № 6(80). – С. 113–119. 11. Щербовських С. В. *Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: моногр.* / С. В. Щербовських. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 296 с.