

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

Національний університет "Львівська політехніка",

* кафедра проектування та експлуатації машин,

** кафедра систем автоматизованого проектування

ВРАХУВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО РОДІВ ПЕРЕМИКАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМИ ІЗ ДВОКРАТНИМ ХОЛОДНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

© Стефанович Т. О., Щербовських С. В., 2018

Запропоновано модель надійності системи із двократним холодним резервуванням та неідеальними перемикальними пристроями, призначену для визначення ймовірності її безвідмовної роботи. Особливість моделі полягає у тому, що у ній враховано помилки першого та другого родів для перемикальних пристроїв. Для визначення ймовірнісних характеристик системи використано динамічне дерево відмов та марковську модель.

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

The reliability model of the system with double cold redundancy and non-ideal switching devices is proposed. The model is developed for the reliability characteristics calculation. The model feature considering errors of the first and the second type for switching devices. Probability characteristics has determined by using dynamic fault tree and Markov model.

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

Вступ. Постановка проблеми. Структурне резервування є одним зі способів підвищення надійності технічних систем. Воно здійснюється введенням у структуру системи резервних елементів, що є надлишковими щодо мінімально необхідних для забезпечення її функціонування. Резервні елементи починають виконувати функцію основних після їх відмови. З погляду надійності найефективнішим типом структурного резервування є холодне резервування. Суть холодного резервування полягає в тому, що у випадку незатребуваності резервних елементів вони перебувають у ненавантаженому режимі. У разі втрати працездатності основних елементів резервні елементи вводяться в дію за допомогою перемикального пристрою. Вплив перемикальних пристроїв на показники надійності системи треба враховувати під час її проектування або аналізу. У системі перемикальні пристрої стають джерелами помилок першого та другого родів. Під помилкою першого роду розуміємо хибне спрацювання перемикального пристрою, яке полягає в тому, що перемикальний пристрій ввімкнув резервний елемент, хоч основний елемент працездатний. Під помилкою другого роду розуміємо пропуск перемикальним пристроєм моменту спрацювання. Це означає, що перемикальний пристрій не ввів у дію резервний елемент, хоча основний елемент відмовив. Обидві помилки погіршують показники надійності системи та спричиняють неповне використання її ресурсу. Це завдання актуальне під час проектування та експлуатації механічних та електротехнічних систем відповідального призначення.

Метою статті є розроблення методики формалізації та аналізу впливу похибок першого та другого родів перемикального пристрою на надійність систем із двократним холодним резервуванням.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз літературних джерел показує, що для розв'язання поставленої задачі використовують два основні підходи. Перший підхід ґрунтується на застосуванні логіко-ймовірнісного методу і полягає в тому, що у структуру системи послідовно до резервних елементів вводять додатковий умовний елемент, який відіграє роль перемикального пристрою [1, 2]. Один з різновидів цього підходу – метод, описаний у роботі [3], який ґрунтується на використанні спрощених емпіричних формул. Недоліком такого підходу є неможливість врахування помилки першого роду та помилки другого роду тільки у першому наближенні. Також не враховано ефект відсутності впливу на систему непрацездатності перемикального пристрою, після того, як він ввів у дію резервні елементи.

Другий підхід потребує побудови графу станів та переходів системи і подальшого його аналізу за допомогою марковської моделі або методу Монте-Карло. Залежно від складності системи та необхідної точності моделювання виділяють декілька способів його застосування. Для простих систем усі побудови виконують вручну [4]. У [5–8] граф станів та переходів будують з використанням технології моделювання систем із елементами, які перебувають у двох або більше станах. У [9–13] обґрунтовано доцільність застосування багатотермінальних динамічних дерев відмов, зокрема і для систем з багатократним холодним резервуванням.

У статті розв'язано такі завдання:

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

Визначення характеристик надійності системи

Опис системи

Досліджувана система складається із джерел енергії G1, G2 та G3 з однаковими характеристиками і перемикальних пристроїв 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).

Система призначена для живлення споживача, під'єданого до виходу перемикального пристрою S2, і вважається працездатною, якщо працездатне джерело з'єднано зі споживачем. Розглянемо принципи функціонування системи за умов її невідновлюваності та неможливості повернення перемикальних пристроїв у попередній стан після спрацювання. Вважаємо, що у початковому стані всі джерела працездатні. Пристрої S1 та S2 з'єднують споживача із джерелом G1, яке у навантаженому стані, тоді як джерела G2 та G3 перебувають у холодному резерві. Після відмови джерела G1 спрацьовує пристрій S1, вводючи в дію джерело G2. Після відмови джерела G2 спрацьовує пристрій S2, вводючи в дію джерело G3. Після відмови джерела G3 система переходить у непрацездатний стан. Якщо пристрій S1 допускає помилку першого роду, то він вмикає резервне працездатне джерело G2 замість основного працездатного джерела G1. Якщо пристрій S1 допускає помилку другого роду, то він не вводить в дію працездатне джерело G2, незважаючи на те, що джерело G1 вийшло з ладу. Якщо пристрій S2 допускає помилку першого роду, то він перемикає споживача на резервне працездатне джерело G3, одночасно від'єднуючи його від одного з працездатних джерел G1 або G2, які

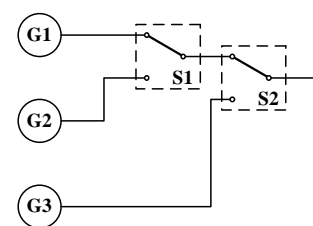


Рис. 1. Структурна схема системи

комутуються перемикальним пристроєм S1. Якщо пристрій S2 допускає помилку другого роду, то він не вводить в дію працездатне джерело G3, залишаючи споживача під'єднаним до одного з двох непрацездатних джерел G1 та G2, які комутуються перемикальним пристроєм S1.

Дерево відмов системи

На першому етапі побудуємо динамічне дерево відмов системи, припускаючи, що перемикальні пристрої є ідеальними, тобто спрацьовують безпомилково і миттєво. На другому етапі врахуємо наявність у роботі пристроїв помилок першого і другого родів.

Непрацездатність системи з ідеальними перемикальними пристроями позначимо блоком “Вершина подій 1” (рис. 2, а). Така непрацездатність виникає, якщо живлення на виході пристрою S1 відсутнє та джерело G3 непрацездатне, що описано блоком “Оператор 1”, тип якого задано логічною операцією І. Живлення на виході пристрою S1 відсутнє за умови непрацездатності джерел G1 і G2, що описано блоком “Оператор 2”, тип якого задано 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 λ_1 , λ_2 , та λ_3 .

У системі відбуваються два динамічні явища, які полягають у зміні інтенсивності напрацювання резервних джерел залежно від стану резервованих джерел. Перше динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання резервного джерела G2 залежно від стану резервованого джерела G1. Для його опису додаємо в дерево відмов блок “Оператор 3”, в якому задаємо логічні умови. Якщо джерело G1 працездатне, то інтенсивність напрацювання джерела G2 становить 0, якщо G1 непрацездатне – λ_2 . Друге динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання резервного джерела G3 залежно від стану резервованого джерела G2. Для опису цього явища в блоці “Оператор 2” задаємо логічні умови. Якщо джерело G2 працездатне, то інтенсивність напрацювання джерела G3 становить 0, а у протилежному випадку, якщо непрацездатне, λ_3 .

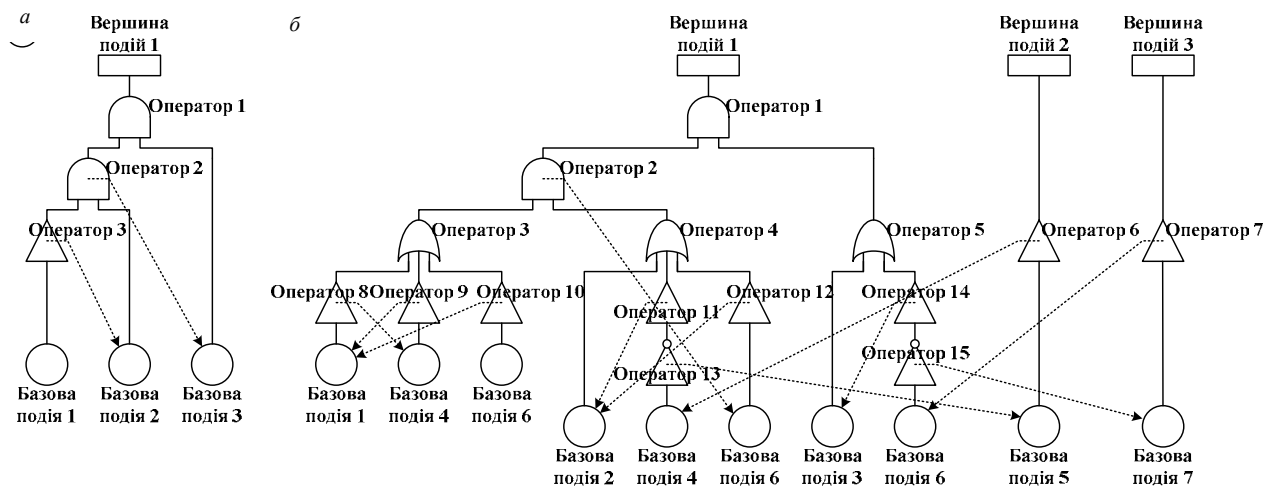


Рис. 2. Дерево відмов системи: а – із ідеальними перемикальними пристроями, б – із урахуванням помилок першого та другого родів перемикальних пристроїв

Для урахування помилок першого та другого родів перемикальних пристроїв у модель треба ввести два явища, а саме самовільне перемикання контактів і напрацювання до відмови системи керування перемикальних пристроїв. Для врахування напрацювання до відмови системи керування перемикальних пристроїв у дерево відмов додано блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” (рис. 2, б), тобто виконано перехід до багатотермінального дерева відмов [12]. Блоком “Вершина подій 2” позначено непрацездатність системи керування пристроєм S1, а блоком “Вершина подій 3” – непрацездатність системи керування пристроєм S2. З погляду надійності система керування перемикальним пристроєм одноелементна, тому блоки “Вершина подій 2” та “Вершина подій 3” аналогічні блокам “Базова подія 5” та “Базова подія 7”. Напрацювання до відмови систем керування пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами λ_5 , та λ_7 .

Для урахування самовільного перемикавання контактів пристроїв у дерево відмов додано блоки “Базова подія 4” та “Базова подія 6”. Блок “Базова подія 4” вказує на стан контактів пристрою S1, а саме: підключення джерела G1 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення джерела G2 – положенням ІСТИННО. Блок “Базова подія 6” вказує на стан контактів пристрою S2, а саме: підключення виходу перемикального пристрою S1 вважаємо положенням ХИБНО, а підключення джерела G3 – положенням ІСТИННО. Ймовірність самовільного перемикавання контактів пристроїв S1 та S2 розподілена за експоненціальним законом із параметрами λ_4 та λ_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 встановлено 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 перебуває у положенні ХИБНО, або контакт перемикального пристрою S2 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 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 13” і “Оператор 15”, тип яких задано логічною операцією НІ.

У системі відбувається одинадцять 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 опису додаємо в дерево відмов блок “Оператор 8”, в якому задаємо логічні умови. Якщо джерело G1 працездатне, то інтенсивність перемикавання пристрою S1 дорівнює λ_4 . У цьому випадку процес самовільного перемикавання є причиною помилки першого роду. Якщо джерело G1 непрацездатне, то інтенсивність перемикавання пристрою S1 збільшуємо у k_1 разів. У такому разі процес перемикавання забезпечує вихід системи із непрацездатного стану.

Друге та третє динамічні явища полягають у зміні інтенсивності напрацювання джерела G1 залежно від положення контактів пристроїв S1 та S2. Для його опису додаємо у дерево відмов блоки “Оператор 9” та “Оператор 10”, в яких задаємо логічні умови. Якщо обидва контакти перебувають у положенні ХИБНО, то інтенсивність напрацювання встановлюємо λ_1 . Якщо хоча б один із контактів перебуває у положенні ІСТИННО, то задаємо, що інтенсивність напрацювання дорівнює нулю. Ці явища забезпечують вимикання джерела G1, якщо хоча б один із перемикачів S1 або S2 від’єднують його від споживача. Введення цих явищ у модель спрощує подальші розрахунки.

Четверте 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 опису в блоці “Оператор 2” задаємо логічні умови. Якщо на виході перемикального пристрою S1 є живлення, то інтенсивність перемикавання пристрою S2 дорівнює λ_6 . У цьому випадку самовільне перемикавання спричиняє помилку 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.

П’яте та шосте динамічні явища полягають у зміні інтенсивності напрацювання джерела G2 залежно від положення контактів пристроїв S1 та S2. Для його опису додаємо у дерево відмов блоки “Оператор 11” та “Оператор 12”, в яких задаємо логічні умови. Якщо контакт пристрою S1 перебуває у положенні ІСТИННО, а контакт пристрою S2 у положенні ХИБНО, то встановлюємо інтенсивність напрацювання λ_2 . Якщо хоча б один із контактів цих пристроїв перебуває у інвертованому положенні, то задаємо, що інтенсивність напрацювання дорівнює нулю. Ці явища забезпечують утримування джерела G2 у холодному резерві, поки у ньому немає потреби, та його відмикання, якщо хоча б один із перемикачів S1 або S2 від’єднує його від споживача.

Сьоме динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристрою S1 залежно від стану його контактів. Для опису цього явища в блоці “Оператор 13” задаємо логічні умови. Якщо контакти пристрою S1 перебувають у положенні ХИБНО, то інтенсивність напрацювання системи

керування цього пристрою дорівнює λ_4 . Якщо контакти перебувають у положенні ІСТИННО, то встановлюємо інтенсивність напрацювання нуль. Введення цього явища у модель спрощує подальші розрахунки.

Восьме динамічне явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S1 залежно від стану його системи керування. Для опису цього явища додаємо в дерево відмов блок “Оператор 6”, в якому задаємо логічні умови. Якщо система керування пристрою S1 працездатна, то інтенсивність перемикання його контактів дорівнює λ_4 . Якщо система керування непрацездатна, то інтенсивність перемикання встановлюємо такою, що дорівнює нулю. Після відмови джерела G1 контакти не зможуть перемкнутись, що спричинить помилку другого роду.

Дев’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 15”.

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

Одинадцять динамічне явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання джерела G3 залежно від положення контактів пристрою S2. Для його опису додаємо у дерево відмов блоки “Оператор 14”, в якому задаємо логічні умови. Якщо контакт перебуває у положенні ІСТИННО, то встановлюємо, що інтенсивність напрацювання дорівнює λ_2 , а якщо контакт перебуває у положенні ХИБНО, то задаємо інтенсивність нуль. Це явище забезпечує утримання джерела G3 у холодному резерві, поки у ньому немає потреби.

Граф станів та переходів системи

Графи станів та переходів для системи із ідеальними перемикальними пристроями (рис. 3, а) та для системи із урахуванням помилок першого та другого родів перемикальних пристроїв (рис. 3, б) побудовано з використанням поданих вище дерев відмов.

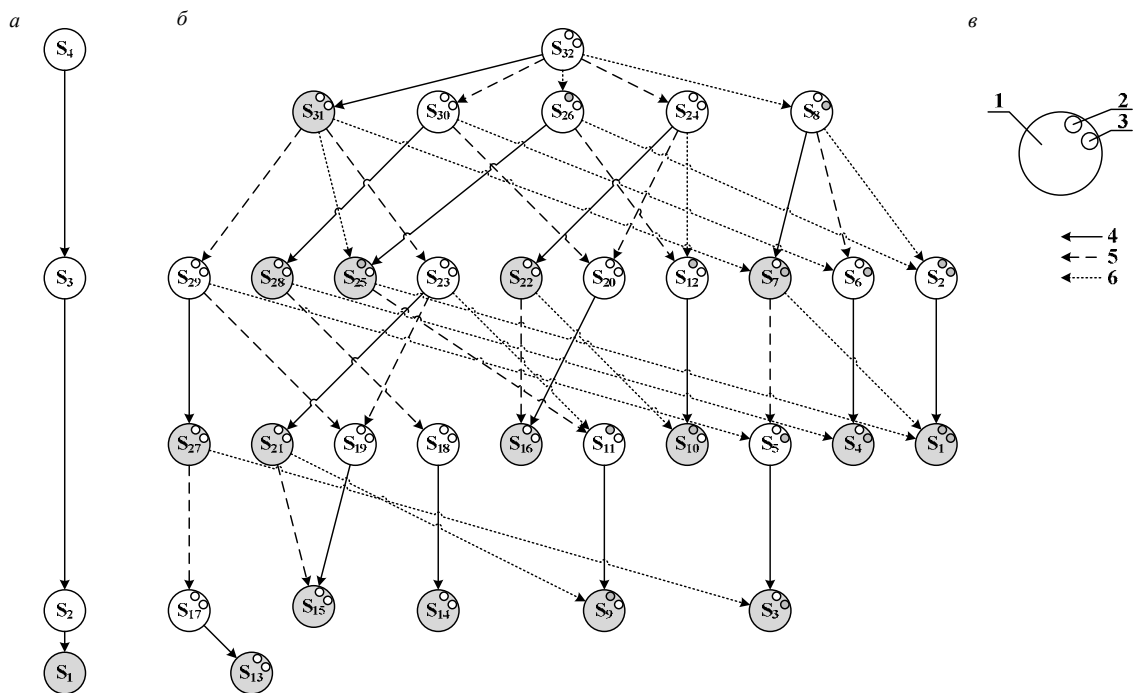


Рис. 3. Граф станів та переходів системи: із ідеальними перемикальними пристроями (а); із урахуванням помилок першого та другого родів перемикальних пристроїв (б); умовні позначення (в)

На рис. 3 працездатні стани зафарбовано білим кольором, а непрацездатні – сірим. Круг 1 (рис. 3, в) відображає стан системи за наявності живлення споживача; круг 2 (рис. 3, в) – стан

системи керування перемикальним пристроєм S1; круг 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 чотири стани, із яких один поглинальний та три переходи. Граф для другої системи (рис. 3, б) містить 32 стани, із яких 9 поглинальних, і 48 переходів.

Аналіз впливу помилок першого та другого родів на ймовірність безвідмовної роботи системи

На основі графів станів та переходів системи побудовано однорідні марковські моделі, за допомогою яких отримано сім'ю кривих ймовірності безвідмовної роботи системи. Під час аналізу впливу помилок першого та другого родів важливе не абсолютне значення кожного із параметрів, а співвідношення параметрів джерел із параметрами перемикальних пристроїв, тому доцільно виконувати обчислення у відносних одиницях. За базову величину беремо інтенсивність відмов джерела G1 $\lambda_1 = 1$. Оскільки джерела G1, G2 та G3 однакові, тому $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$. Припускаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикання першого пристрою S1 λ_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 для випадку миттєвого спрацювання перемикача дорівнює безмежності. Перемикальний пристрій S2 у номінальному режимі роботи повинен бути інерційнішим за пристрій S1, оскільки у момент перемикання пристрою S1 на виході пристрою S2 зникає живлення, що система керування пристрою S2 сприймає як команду на його перемикання. Тому менша інерційність пристрою S1 зменшує ймовірність помилки першого роду. Припускаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикання пристрою S2 λ_6 до середньої тривалості перемикання у номінальному режимі роботи становить $k_2 = 10\,000$. Оскільки перемикальні пристрої однакові за показниками надійності, то $\lambda_4 = \lambda_6$ та $\lambda_5 = \lambda_7$.

На рис. 4, а подано сім'ю кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів $\lambda_4 = \lambda_6$, які відповідають помилці першого роду, за умови $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$. 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 подано сім'ю кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів $\lambda_5 = \lambda_7$, які відповідають помилці другого роду, за умови $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$. 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 подано сім'ю кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень відношення k_1/k_2 , які відповідають інерційності перемикальних пристроїв, за умови $\lambda_4 = \lambda_6 = 1$ та $\lambda_5 = \lambda_7 = 1$. Крива 1 відображає відношення $k_1/k_2 = 100$; крива 2 – $k_1/k_2 = 10$; крива 3 – $k_1/k_2 = 0,1$.

Щоб уможливити порівняння результатів, накреслені потовщеною лінією крива 4 на рис. 4, а, крива 2 на рис. 4, б та крива 2 рис. 4, в є однією і тією ж 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 ∞ , де значення 0 відповідає відсутності впливу помилки, а значення ∞ – абсолютному впливу цієї помилки на безвідмовність системи. Як видно із рис. 4, у разі покрокового збільшення значень параметрів $\lambda_4 = \lambda_6$ та $\lambda_5 = \lambda_7$ ймовірність безвідмовної роботи системи виявляє тенденцію до зниження.

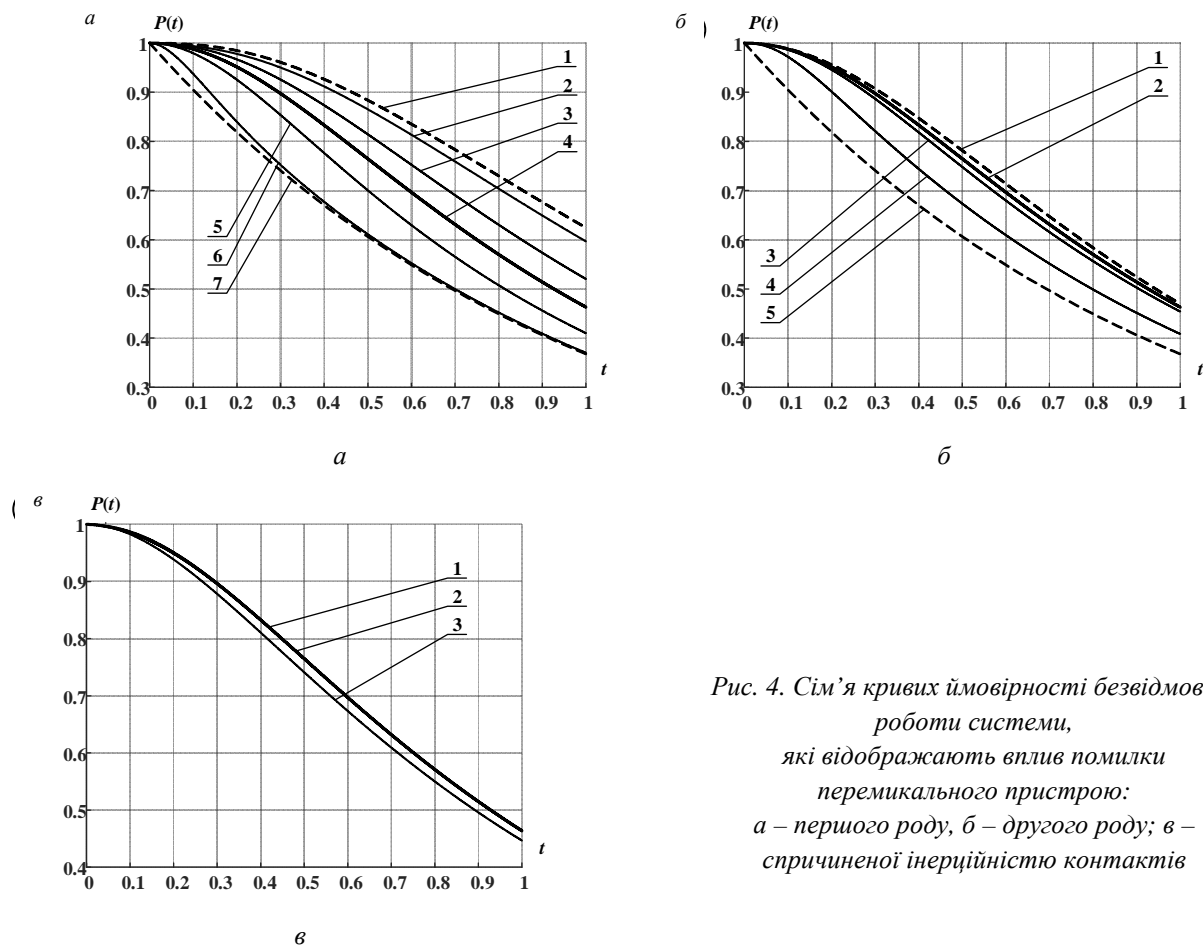


Рис. 4. Сім'я кривих ймовірності безвідмовної роботи системи, які відображають вплив помилки перемикального пристрою: а – першого роду, б – другого роду; в – спричиненої інерційністю контактів

Висновки. У статті розроблено математичну модель надійності, яка призначена для встановлення ймовірності безвідмовної роботи системи із двократним холодним резервуванням та враховує помилки першого і другого родів перемикальних пристроїв. Надійність системи математично описано багатотермінальним динамічним деревом відмов із заданням логічних умов взаємного впливу елементів системи та перемикальних пристроїв. Ймовірнісні характеристики системи визначено за сформованою на основі дерева відмов марковською моделлю. За її допомогою проаналізовано, як впливають помилки першого та другого родів перемикальних пристроїв на ймовірнісні характеристики досліджуваної системи. Кількісно показано зниження ймовірності безвідмовної роботи системи у разі збільшення інтенсивності самовільного перемикавання контактів та інтенсивності відмов системи керування перемикального пристрою.

Подальші дослідження скеровані на розроблення узагальнених правил складання моделей надійності систем із багатократним резервуванням, у яких враховуватиметься вплив помилок першого та другого родів 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. 4. 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. 5. Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочий. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2004. – 219 с. 6. 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. 7. 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. 8. 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. 9. 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. 10. 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. 11. 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. 12. Стефанович Т. О. Врахування помилок першого та другого роду перемикального пристрою для системи із двократним гарячим резервуванням / Т. О. Стефанович, С. В. Щербовських // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”*. – 2017. – № 867. – С. 29–35. 13. Щербовських С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження: монографія / С. В. Щербовських. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 296 с.