

УДК 519.873

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.140535

## ВРАХУВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРЕМИКАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМИ ІЗ КОВЗНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ДЕРЕВА ВІДМОВ

Стефанович Т. О., Щербовських С. В.

*Об'єктом дослідження є невідновлювана система з однократним ковзним резервуванням. Така система складається із двох основних підсистем, однієї резервної та двох перемикальних пристроїв. Поки обидві основні підсистеми працездатні, резервна підсистема перебуває у ненавантаженому стані. Резервна система призначена для заміни будь-якої основної підсистеми після її відмови. Перемикальні пристрої комутують основні підсистеми із резервною. В ході аудиту виявлено, що перемикальні пристрої допускають помилки. Зокрема помилку першого роду, тобто перемикаються завчасно, та помилку другого роду, тобто пропускають момент перемикавання. Це знижує надійність системи та веде до недовикористання закладеного в неї ресурсу.*

*Запропоновано підхід, який кількісно враховує вплив помилок першого та другого роду на ймовірність безвідмовної роботи досліджуваної системи під час її проектування. Підхід складається з двох етапів. На першому етапі надійність системи математично описується динамічним деревом відмов. На другому етапі на основі дерева відмов формується марковська модель. Застосовуючи її, можна обчислити ймовірнісні характеристики системи.*

*Отриманим результатом є математична залежність між ймовірністю безвідмовної роботи системи та параметрами елементів системи. Зокрема, параметрами напрацювання до відмови основних та резервних підсистем, а також параметрами перемикальних пристроїв, які відповідають помилкам першого та другого роду. Формою представлення отриманих результатів для кінцевого користувача є програмний продукт, який автоматизовано генерує сімейство графіків для оцінювання надійності. Ігнорування помилок перемикальних пристроїв під час проектування систем знижує їх фактичну надійність, призводить до недовикористання ресурсів резервних елементів, а також збільшує ймовірність аварійних ситуацій.*

*Використання більш точної математичної моделі дає можливість контролювати помилки перемикальних пристроїв під час проектування системи. Результати моделювання будуть корисні для вибору параметрів перемикальних пристроїв.*

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

### 1. Вступ

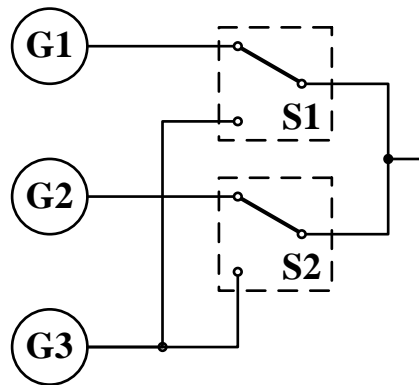
Для підвищення показників надійності технічних систем застосовують структурне резервування. Таке резервування полягає у тому, що в структуру

системи додають надлишкові елементи, які після відмови основних елементів та подальшої комутації беруть на себе виконання їх функцій. Одним із видів структурного резервування, яке зустрічаємо на практиці, є ковзне резервування. Таке резервування застосовують у тому випадку, якщо система складена із кількох однакових підсистем, які усі одночасно повинні функціонувати, щоб система була працездатною. Ковзне резервування полягає у тому, що у систему додають надлишкову підсистему, яка здатна замінити собою будь-яку основну підсистему. Поки усі основні підсистеми працездатні, резервна підсистема перебуває у ненавантаженому стані. За потреби, в структуру системи можуть додати кілька резервних підсистем. У роботі розглянуто найпростіший різновид резервування, за якого система складена із двох основних підсистем та однієї резервної. Під час аналізу надійності систем із ковзним резервуванням одним із важливих факторів є врахування впливу перемикальних пристроїв. Цей вплив полягає у появі помилок першого і другого роду. Під помилкою першого роду розуміємо хибне спрацювання перемикального пристрою. Це означає, що основні підсистеми працездатні, але перемикальний пристрій вирішив, що одна із них непрацездатна, і підключив резервну. Під помилкою другого роду розуміємо пропуск моменту спрацювання перемикальним пристроєм. Це означає, що одна із основних підсистем відмовила, але перемикальний пристрій вирішив, що така підсистема працездатна, і не підключив резервну. Обидві помилки знижують надійність системи та спричиняють недовикористання закладеного в неї ресурсу. Описана проблема із перемикальними пристроями актуальна під час проектування та експлуатації механічних та електротехнічних систем відповідального призначення.

Дана робота є частиною циклу публікацій, присвячених пошуку підходів щодо врахування впливу помилок перемикальних пристроїв для систем із різними типами резервування. В [1] описано як коректно врахувати та оцінити вплив помилки перемикального пристрою для системи за схемою 2-із-3. Ця робота є продовженням даного дослідження за умови, що резервний елемент є ненавантаженим.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження* є невідновлювана система із однократним ковзним резервуванням. До її складу входять однакові джерела енергії  $G1$ ,  $G2$  та  $G3$  і однакові перемикальні пристрої  $S1$  і  $S2$ . Пристрій  $S1$  здійснює перемикання між джерелами  $G1$  та  $G3$ , а пристрій  $S2$  – між джерелами  $G2$  та  $G3$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Структурна схема системи

Система призначена для живлення споживача енергією, який підключений до спільної точки, що з'єднує виходи перемикальних пристроїв S1 та S2. Система працездатна, якщо хоча б два працездатних джерела з'єднано із 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. Перемикальний пристрій S1 підключає споживача до джерела G1, а пристрій S2 – до джерела G2. Джерело G3 у цей час перебуває у холодному резерві. У випадку відмови джерела G1 пристрій S1 перемикається та підключає споживача до джерела G3. У випадку відмови джерела G2 пристрій S2 перемикається та підключає споживача до джерела G3. Одразу після підключення джерело G3 переходить у навантажений режим. У випадку відмови обох джерел G1 та G2, незалежно від стану джерела G3, система стає непрацездатною.

Характерним недоліком системи є те, що перемикальні пристрої S1 та S2 здійснюють помилки, які знижують її показники надійності. Якщо пристрій S1 допускає помилку першого роду, то він замість працездатного джерела G1 підключає джерело G3. Якщо пристрій S1 допускає помилку другого роду, то він не підключає джерело G3 замість непрацездатного джерела G1. Якщо пристрій S2 допускає помилку першого роду, то він замість працездатного джерела G2, незалежно від стану пристрою S1, підключає джерело G3. Якщо пристрій S2 допускає помилку другого роду, то він не підключає джерело G3 замість непрацездатного джерела G2.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою роботи* є формалізація та аналіз впливу похибок першого та другого роду перемикального пристрою на характеристики надійності невідновлюваної системи із однократним ковзним резервуванням.

Для досягнення поставленої мети розв'язати такі задачі:

1. Математично описати надійність системи із ковзним резервуванням та перемикальними пристроями на основі багатотермінального динамічного дерева відмов.

2. Побудувати граф станів і переходів системи та перетворити його у марковську модель, призначену для обчислення ймовірності безвідмовної роботи системи із врахуванням параметрів помилок перемикальних пристроїв.

#### 4. Дослідження існуючих рішень проблеми

У науковій літературі запропоновано кілька підходів до розв'язання поставленої проблеми. Перший підхід ґрунтується на застосуванні математичного симулювання методом Монте-Карло. З цією метою в [2, 3] динамічні явища у системі формалізовано деревом відмов, а в [4] діаграмою бінарного вибору (Decision Binary Diagram). Для цього підходу початковий спосіб формалізації не є настільки важливим. Підхід може бути адекватно застосований для довільних законів розподілу та різних структурних схем системи. Базовим недоліком даного підходу є спотворення результатів симулювання випадковими флуктуаціями. Величина таких флуктуацій настільки висока, що не вдається адекватно відобразити вплив похибки перемикального пристрою на надійність системи.

Другий підхід ґрунтується на застосуванні марковських моделей. В [5] показано, як використовуючи звичайне дерево відмов, сформовано марковську модель. Ґрунтуючись на такій моделі, обчислено інтегральні показники надійності та дана оцінка причинам непрацездатності системи. Недоліком роботи є неможливість описати динамічні явища, якщо використовується звичайне дерево відмов, та громіздкість марковських моделей. В [6] показано, як використовуючи логічні умови у блоках дерева відмов, описати динамічні явища перерозподілу навантаження та сформуванню відповідну марковську модель. В [7] динамічні явища формалізовано блоками «Priority-AND», «Priority-OR», «PDEP», «SEQ», «SPARE». Автори приділили увагу технології побудови та редукування марковської моделі на основі використання її симетрії. Недолік обох робіт полягає у неможливості математично описати роботу перемикального пристрою. В [8] для формалізації динамічних явищ використовують «Functional Dependency Gate», «Spare Gate» та «Priority-AND Gate». У дереві відмов всієї системи виділяють динамічні піддерева відмов, для яких формують багатократні діаграми вибору. Ґрунтуючись на таких діаграмах, створюють та обчислюють марковську модель. Недоліком підходу залишається питання формалізації опису системи із ковзним резервуванням. Окрім того, роздільний аналіз динамічних явищ в такій системі буде складніший за безпосередній її марковський аналіз.

Третій підхід ґрунтується на застосуванні множини евристичних методів, які спрощують або не використовують марковські моделі. В [9] надійність системи формалізують звичайним деревом відмов. Для опису динамічних явищ отримане дерево перетворюють у «Dynamic Uncertain Causality Graph». Одержаний граф обчислюють на основі алгебраїчних методів. Недоліком методу є неможливість формалізувати увесь спектр явищ, пов'язаних із надійністю перемикального пристрою. В [10] динамічні явища формалізовано з використанням єдиного оператора «FDEP», який розглядається як функціональна залежність. Дерево відмов системи аналізують з точки зору

функціонування системи в різних режимах. Для кожного режиму виконано комбінаторне обчислення на основі формули повної ймовірності. Результати за окремими обчисленнями режимів зведено до єдиного числа. Описаний спосіб спрощення дерева відмов не забезпечує адекватного опису впливу помилок перемикального пристрою на надійність системи. В [11–13] формалізація динамічних явищ виконується на основі операторів «Cold Spare Gate» та «Priority-AND Gate». Автори пропонують виконати декомпозицію цих операторів до звичайних OR і AND на основі інтегральних виразів, а ймовірнісні показники обчислювати стохастичним методом. В основі методу покладено перестановки за певними правилами одиниць і нулів у виразі ймовірності, яку подано у формі двійкового числа. Недолік цього підходу полягає у складності формалізувати надійність системи із ковзним резервуванням та подальшої логіки функціонування перемикального пристрою.

### 5. Методи дослідження

На першому етапі побудуємо дерево відмов системи, виходячи із 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 «Top Event 1» (рис. 2).

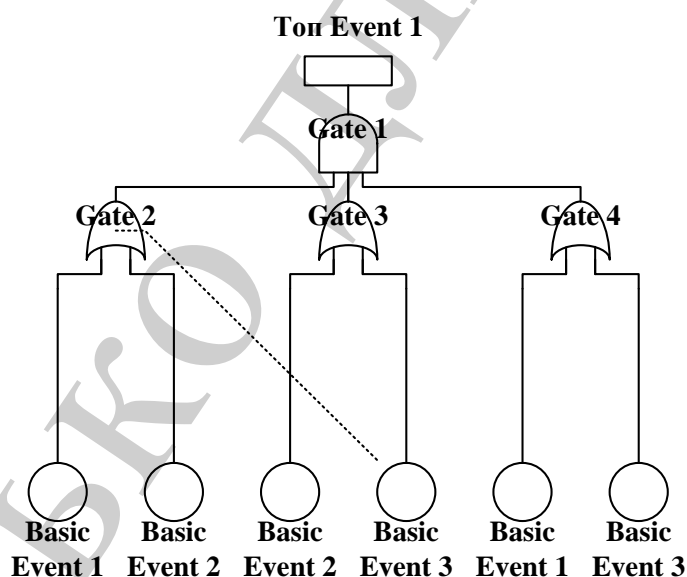


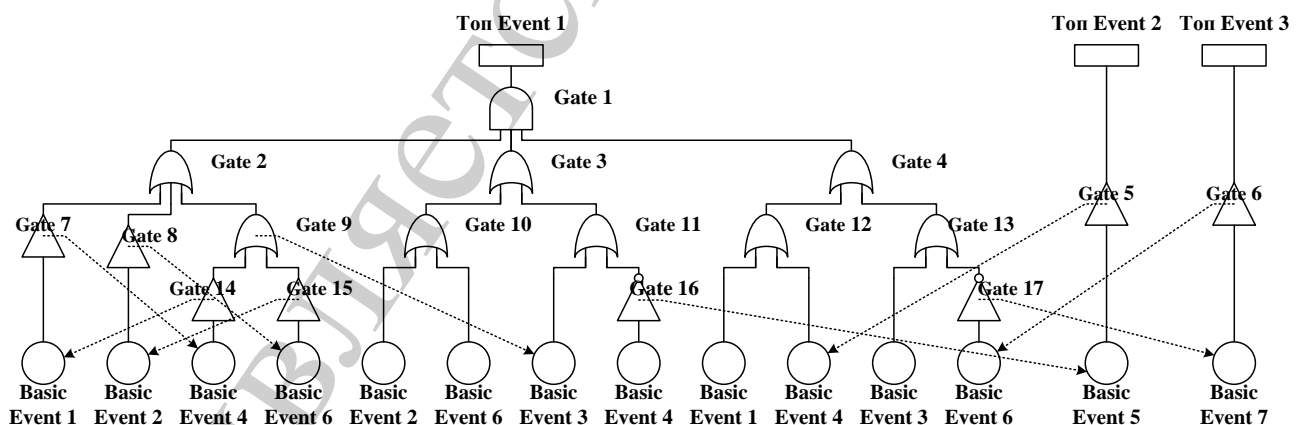
Рис. 2. Дерево відмов системи із ідеальними перемикальними пристроями

Така непрацездатність виникає, якщо живлення до споживача не можна подати ні основним способом, ні двома резервними способами, що описано блоком «Gate 1», тип якого задано логічною операцією AND. Основним способом не можна живити споживача, якщо відсутнє живлення хоча б від одного із джерел G1 або G2, що описано блоком «Gate 2», тип якого задано логічною операцією OR. Першим резервним способом не можна живити споживача, якщо відсутнє живлення від джерела G2 або G3, що описано блоком

«Gate 3», тип якого задано логічною операцією OR. І, другим резервним способом, – якщо відсутнє живлення від джерела G1 або G3, що описано блоком «Gate 4», тип якого задано логічною операцією OR. Причиною відсутності живлення від джерела є його відмова. Вважаємо, що напрацювання до відмови джерел G1, G2 та G3 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , та  $\lambda_3$ .

У системі відбувається динамічне явище, яке полягає у зміні інтенсивності напрацювання резервного джерела G3 залежно від стану основних джерел G1 та G2. Для опису цього явища в блоці «Gate 2» задаємо логічну умову. Якщо обидва генератори G1 та G2 працездатні, тобто сигнал на виході блоку є FALSE, то інтенсивність напрацювання генератора G3 дорівнює нулеві. Якщо хоча б один із генераторів G1 або G2 непрацездатний, тобто сигнал на виході блоку є TRUE, то інтенсивність напрацювання генератора G3 встановлюємо рівною  $\lambda_3$ .

Для опису непрацездатності системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв у моделі слід урахувати 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 «Top Event 2» та «Top Event 3» (рис. 3), тобто дерево відмов є багатотермінальним. Блок «Top Event 2» позначає непрацездатність системи керування пристрою S1, а блок «Top Event 3» позначає непрацездатність системи керування пристрою S2. Оскільки система керування перемикальним пристроєм, з точки зору надійності, є одноелементною, то блоки «Top Event 2» та «Top Event 3» за змістом відповідають блокам «Basic Event 5» та «Basic Event 7». Напрацювання до відмови систем керування пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_5$ , та  $\lambda_7$ .



**Рис. 3.** Дерево відмов системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв

Для врахування самовільного перемикання контактів пристроїв у дерево відмов додано блоки «Basic Event 4» та «Basic Event 6». Блок «Basic Event 4» вказує на стан контактів пристрою S1, зокрема, підключення джерела G1 вважаємо положенням FALSE, а підключення джерела G3 – положенням TRUE. Блок «Basic Event 6» вказує на стан контактів пристрою S2, зокрема,

підключення джерела G2 вважаємо положенням FALSE, а підключення джерела G3 – положенням TRUE. Ймовірність самовільного перемикання контактів пристроїв S1 та S2 розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_4$  та  $\lambda_6$ . Відсутність живлення від джерела G1 виникає, якщо це джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S1 знаходиться у положенні TRUE. Це описано блоками «Gate 7» та «Gate 12», тип яких задано логічною операцією OR. У свою чергу, відсутність живлення від джерела G2, виникає, якщо це джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні TRUE. Це описано блоками «Gate 8» та «Gate 10», тип яких задано логічною операцією OR. Відсутність живлення від джерела G3, виникає у двох випадках. По-перше, таке джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S1 знаходиться у положенні FALSE. Це описано блоком «Gate 11», тип якого задано логічною операцією OR. І, по-друге, таке джерело відмовило або контакт перемикального пристрою S2 знаходиться у положенні FALSE. Це описано блоком «Gate 13», тип якого задано логічною операцією OR. Для інверсії сигналів від блоків «Basic Event 4» та «Basic Event 6» застосовано блоки «Gate 16» і «Gate 17», тип яких задано логічною операцією NOT.

У системі відбувається дев'ять динамічних явищ, які полягають у зміні інтенсивності напрацювання елементів та інтенсивності перемикання контактів залежно від стану інших елементів.

Перше явище полягає у зміні навантаження резервного генератора G3 залежно від стану перемикальних пристроїв S1 та S2. Для його опису додаємо у дерево відмов блок «Gate 9» типу OR, в якому встановлюємо логічну умову. Якщо обидва перемикальні пристрої перебувають у стані FALSE, то інтенсивність напрацювання генератора G3 дорівнює нулеві, тобто генератор G3 перебуває у ненавантаженому стані. Якщо хоча б один із перемикачів S1 або S2 підключив генератор G3, то його інтенсивність напрацювання становить  $\lambda_4$ .

Друге явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S1 залежно від стану джерела G1. Для його опису додаємо в дерево відмов блок «Gate 7», в якому задаємо логічну умову. Якщо джерело G1 працездатне, то інтенсивність перемикання пристрою S1 дорівнює  $\lambda_4$ . У цьому випадку процес самовільного перемикання є джерелом помилки першого роду. Якщо джерело G1 непрацездатне, то інтенсивність перемикання пристрою S1 збільшуємо у  $k$  разів. У цьому випадку процес перемикання забезпечує вихід системи із непрацездатного стану.

Третє явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S2 залежно від стану джерела G2. У дереві відмов воно описано аналогічно до другого динамічного явища із додаванням блока «Gate 8».

Четверте явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання джерела G1 залежно від стану контактів перемикального пристрою S1. Для його опису додаємо в дерево відмов блок «Gate 14», в якому задаємо логічну умову. Якщо контакти перемикача S1 перебувають у положенні FALSE, то інтенсивність напрацювання джерела G1 становить  $\lambda_1$ . Якщо контакти перемикача S2 в

положенні TRUE, то інтенсивність напрацювання джерела G1 становить 0. Введення цього явища у модель спрощує подальші розрахунки.

П'яте явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання джерела G2 залежно від стану контактів перемикального пристрою S2. У дереві відмов воно описано аналогічно до четвертого динамічного явища із додаванням блока «Gate 15».

Шосте явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування перемикальним пристроєм S1 залежно від стану його контактів. Для опису цього явища в блоці «Gate 16» задаємо логічну умову. Якщо контакти пристрою S1 перебувають у положенні FALSE, то інтенсивність напрацювання системи керування цього пристрою дорівнює  $\lambda_5$ . Якщо контакти перебувають у положенні TRUE, то інтенсивність напрацювання встановлюємо рівною нулю. Введення цього явища у модель спрощує подальші розрахунки.

Сьоме явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S1 залежно від стану його системи керування. Для опису цього явища додаємо в дерево відмов блок «Gate 5», в якому задаємо логічні умови. Якщо система керування пристроєм S1 працездатна, то інтенсивність перемикання його контактів дорівнює  $\lambda_4$ . Якщо система керування відмовила, то інтенсивність перемикання встановлюємо рівною нулю. Це означає, що після відмови джерела G1 контакти не зможуть перемкнутись, що спричинить помилку другого роду.

Восьме явище полягає у зміні інтенсивності напрацювання системи керування пристроєм S2 залежно від стану його контактів. У дереві відмов воно описано аналогічно до шостого явища із застосуванням блока «Gate 17» та параметра  $\lambda_7$ .

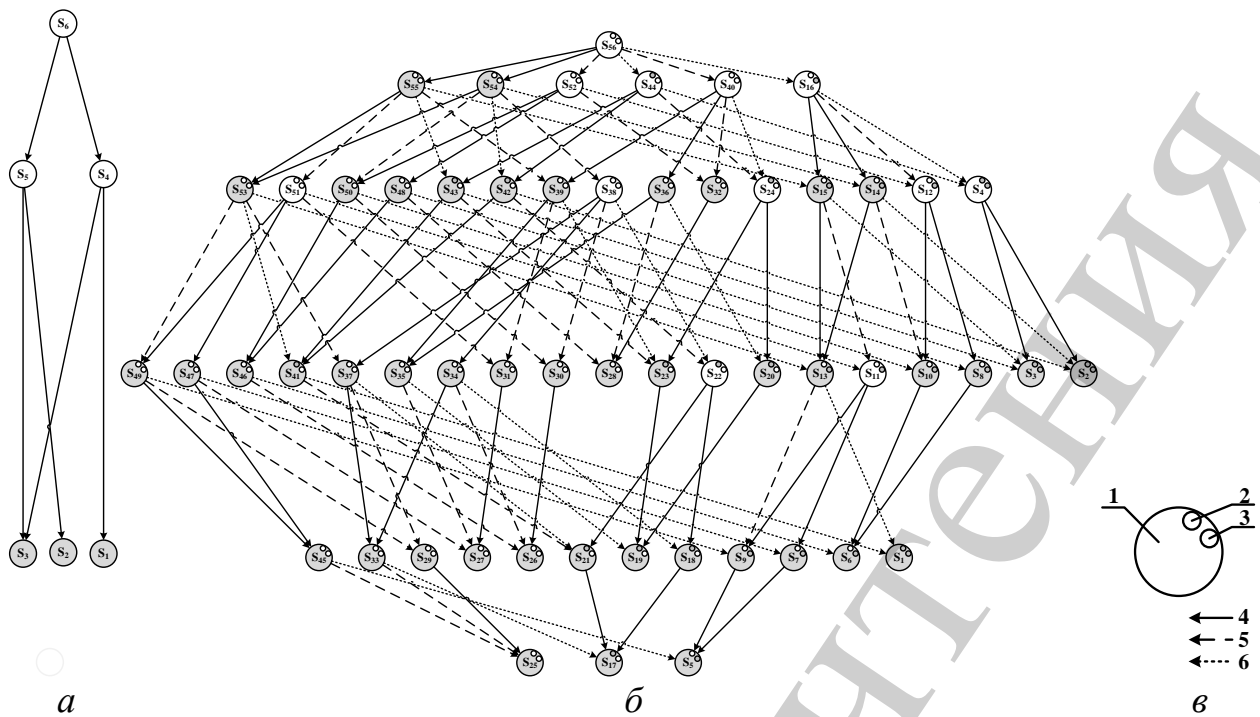
Дев'яте явище полягає у зміні інтенсивності перемикання пристрою S2 залежно від стану його системи керування. У дереві відмов воно описано аналогічно до сьомого явища із додаванням блока «Gate 6».

## **6. Результати дослідження**

### **6.1. Граф станів та переходів системи**

На підставі поданих вище дерев відмов побудовано графи станів та переходів для системи із ідеальними перемикальними пристроями (рис. 4, а) та для системи із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв (рис. 4, б).





**Рис. 4.** Граф станів та переходів системи: *а* – із ідеальними перемикальними пристроями; *б* – із врахуванням помилок першого та другого роду перемикальних пристроїв; *в* – умовні позначення

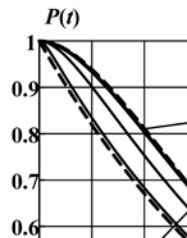
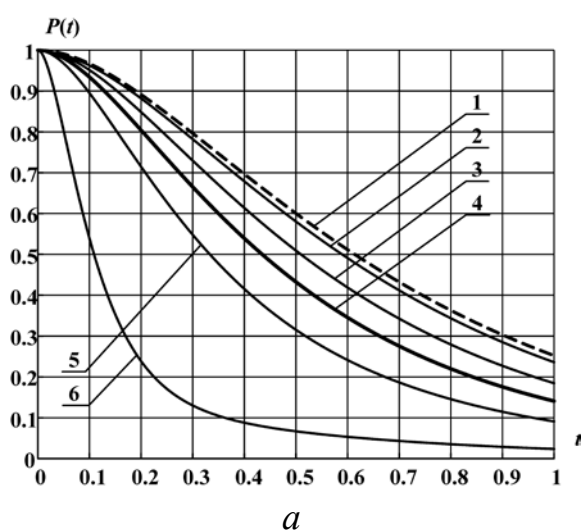
На рис. 4 працездатні стани зафарбовані білим кольором, а непрацездатні – сірим. Коло 1 (рис. 4, в) відображає стан системи за наявності живлення споживача; коло 2 (рис. 4, в) – стан системи керування перемикальним пристроєм  $S_1$ ; коло 3 (рис. 4, в) – стан системи керування пристроєм  $S_2$ . Суцільна дуга 4 відображає відмову джерел  $G_1$ ,  $G_2$  та  $G_3$ ; штрихова дуга 5 – перемикання контакту пристроїв  $S_1$  та  $S_2$ ; пунктирна дуга 6 – відмову системи керування пристроїв  $S_1$  та  $S_2$ . Граф для першої системи (рис. 4, б) містить 6 станів, із яких 3 поглинальні, і 6 переходів. Граф для другої системи (рис. 4, б) містить 56 станів, із яких 11 поглинальних, і 114 переходів.

## 6.2. Аналіз впливу помилок першого та другого роду на ймовірність безвідмовної роботи системи

Грунтуючись 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  $G_1$   $\lambda_1=1$ . Оскільки джерела  $G_1$ ,  $G_2$  та  $G_3$  є однаковими, тому  $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ . Приймаємо, що відношення інтенсивності самовільного перемикання першого пристрою  $S_1$   $\lambda_4$  до середньої тривалості перемикання у номінальному режимі роботи становить  $k_1=10\ 000$ . Значення цього відношення обернено пропорційно інерційності спрацювання

перемикального пристрою і, в граничному випадку, має прямувати до нескінченості. Оскільки перемикальні пристрої однакові, тому  $\lambda_4=\lambda_6$  та  $\lambda_5=\lambda_7$ .

На рис. 5, а подано 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 –  $\lambda_4=\lambda_6=2$  та крива 6 –  $\lambda_4=\lambda_6=10$ .



**Рис. 5.** Сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи, які показують вплив помилки перемикального пристрою:  
а – першого роду; б – другого роду

На рис. 5, б подано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметрів  $\lambda_5=\lambda_7$ , які відповідають помилці другого роду, за умови  $\lambda_4=\lambda_6=1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $\lambda_5=\lambda_7=0$ ; крива 2 –  $\lambda_5=\lambda_7=1$ ; крива 3 –  $\lambda_5=\lambda_7=10$ , крива 4 –  $\lambda_5=\lambda_7=100$  та крива 5 –  $\lambda_5=\lambda_7=\infty$ .

З метою порівняння результатів, крива 4 на рис. 5, а та крива 2 на рис. 5, б, які накреслені потовщеними лініями, є однією і тією ж характеристикою, що відповідає умові  $\lambda_4=\lambda_6=1$  та  $\lambda_5=\lambda_7=1$ . 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. На рис. 5, а криву, яка відповідає умові  $\lambda_4=\lambda_6=\infty$ , не показано, тому що безвідмовність у цьому випадку прямує до 0. Це відповідає випадку, за якого у початковий момент обидва перемикальні пристрої спрацьовують, що одразу переводить систему у непрацездатний стан.

Як видно із поданих на рис. 5 графіків, при покроковому збільшенні параметрів  $\lambda_4=\lambda_6$  та  $\lambda_5=\lambda_7$  імовірність безвідмовної роботи системи знижується. На кривих рис. 5, б, побудованих для похибки другого роду, під час зміни параметрів  $\lambda_5=\lambda_7$  у межах від 0 до 1 спостерігаємо збільшення впливу помилки другого роду, яка спричиняє зростання безвідмовності системи. У результаті спостерігаємо явище, за якого для часу  $t=1$  безвідмовність системи, в якій

помилка другого роду відсутня, є нижчою за безвідмовність системи, в якій взагалі відсутнє резервування. Це явище потребує подальшого дослідження.

## **7. SWOT-аналіз результатів дослідження**

*Strengths.* Врахування помилок перемикальних пристроїв під час аналізу надійності невідновлюваної системи із однократним ковзним резервуванням сприяє більш ефективному використанню резервних елементів, підвищенню ймовірності безвідмовної роботи системи та опосередковано скороченню витрат на ліквідацію аварійних ситуацій.

*Weaknesses.* Застосування багатотермінального дерева відмов із великою кількістю динамічних зв'язків та марковського аналізу суттєво ускладнюють математичні обчислення, що вимагає залучення фахівця з надійності. За збільшення кількості основних або резервних елементів розроблена модель вимагає суттєвого доопрацювання, починаючи з етапу побудови дерева відмов.

*Opportunities.* Отримані результати будуть використані під час розроблення узагальненої методики побудови математичних моделей надійності для різних типів структурного резервування. Окремого дослідження потребує явище, за якого безвідмовність системи, в якій помилка другого роду відсутня, є нижчою за безвідмовність системи, в якій взагалі відсутнє резервування.

*Threats.* Модель надійності, побудована у роботі, сформована із умови, що напрацювання елементів до відмови, а також потік помилок першого та другого роду розподілені експоненціально. Якщо реальний розподіл буде суттєво відрізнятися від експоненціального, то виграш в точності може бути нівельований.

## **8. Висновки**

1. У роботі динамічне дерево відмов невідновлюваної системи з однократним ковзним резервуванням та ідеальними перемикальними пристроями було перетворене в багатотермінальне динамічне дерево відмов. Завдяки цьому вдалося ввести в модель дев'ять динамічних явищ взаємного впливу елементів та перемикачів, зокрема, такі явища, як самовільне перемикання контактів і напрацювання до відмови системи керування перемикальних пристроїв. В результаті вихідне динамічне дерево відмов, яке містило 1 блок «Top Event», 4 блока «Gate» та 6 блоків «Basic Event» ускладнилося до 3 блоків «Top Event», 17 блоків «Gate» та 14 блоків «Basic Event». Однак це дало можливість врахувати вплив помилок перемикальних пристроїв на ймовірність безвідмовної роботи системи.

2. Внаслідок заміни ідеальних перемикальних пристроїв на перемикальні пристрої, які допускають помилки, кількість станів системи для графа станів та переходів збільшилась з 6 до 56, а кількість переходів зросла з 6 до 114. Це дозволило врахувати стани, в яких перебуває система загалом та стани системи керування окремих перемикальних пристроїв. В марковській моделі системи додано параметри перемикальних пристроїв, такі як інтенсивність хибного спрацювання перемикального пристрою, яка відповідає помилці першого роду,

та інтенсивність напрацювання системи керування перемикальним пристроєм, яка відповідає помилці другого роду. Встановлено, що за покрокового збільшення інтенсивності перемикання контактів перемикальних пристроїв та інтенсивності напрацювання системи керування перемикальних пристроїв, ймовірність безвідмовної роботи системи знижується.

### Література

1. Stefanovych T., Shcherbovskykh S. Taking into account type i and ii errors of switching device for system with 2-out-of-3 redundancy. Information extraction and processing. 2017. Vol. 45, Issue 121. P. 56–62.
2. Zhang P., Chan K. W. Reliability Evaluation of Phasor Measurement Unit Using Monte Carlo Dynamic Fault Tree Method // IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 3, Issue 3. P. 1235–1243. doi: <http://doi.org/10.1109/tsg.2011.2180937>
3. Shcherbovskykh S., Lozynsky O., Marushchak Y. Failure Intensity determination for system with standby doubling // Przegląd Elektrotechniczny. 2011. Vol. 87, Issue 5. P. 160–162.
4. Lin Y.-H., Li Y.-F., Zio E. A Reliability Assessment Framework for Systems With Degradation Dependency by Combining Binary Decision Diagrams and Monte Carlo Simulation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2016. Vol. 46, Issue 11. P. 1556–1564. doi: <http://doi.org/10.1109/tsmc.2015.2500020>
5. Development of a reliability model to analyse the causes of a poultry module failure / Shcherbovskykh S. et. al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 3 (82). P. 4–9. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73354>
6. Shcherbovskykh S., Stefanovych T. Reliability model developing for protective fittings taking into account load-sharing effect // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 1, Issue 3 (73). P. 37–44. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.35951>
7. Volk M., Junges S., Katoen J.-P. Fast Dynamic Fault Tree Analysis by Model Checking Techniques // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14, Issue 1. P. 370–379. doi: <http://doi.org/10.1109/tii.2017.2710316>
8. Yuchang M. A Multiple-Valued Decision-Diagram-Based Approach to Solve Dynamic Fault Trees // IEEE Transactions on Reliability. 2014. Vol. 63, Issue 1. P. 81–93. doi: <http://doi.org/10.1109/tr.2014.2299674>
9. Zhou Z., Zhang Q. Model Event/Fault Trees With Dynamic Uncertain Causality Graph for Better Probabilistic Safety Assessment // IEEE Transactions on Reliability. 2017. Vol. 66, Issue 1. P. 178–188. doi: <http://doi.org/10.1109/tr.2017.2647845>
10. Xing L., Morrissette B. A., Dugan J. B. Combinatorial Reliability Analysis of Imperfect Coverage Systems Subject to Functional Dependence // IEEE Transactions on Reliability. 2014. Vol. 63, Issue 1. P. 367–382. doi: <http://doi.org/10.1109/tr.2014.2299431>

11. Stochastic Approach for the Analysis of Dynamic Fault Trees With Spare Gates Under Probabilistic Common Cause Failures / Zhu P. et. al. // IEEE Transactions on Reliability. 2015. Vol. 64, Issue 3. P. 878–892. doi: <http://doi.org/10.1109/tr.2015.2419214>
12. A Stochastic Approach for the Analysis of Fault Trees With Priority AND Gates / Zhu P. et. al. // IEEE Transactions on Reliability. 2014. Vol. 63, Issue 2. P. 480–494. doi: <http://doi.org/10.1109/tr.2014.2313796>
13. Approximate reliability of multi-state two-terminal networks by stochastic analysis / Zhu P. et. al. // IET Networks. 2017. Vol. 6, Issue 5. P. 116–124. doi: <http://doi.org/10.1049/iet-net.2017.0033>

Только для чтения