

УДК 519.718.2

**О. Ю. Лозинський**, д-р техн. наук,  
**С. В. Щербовських**, канд. техн. наук

### ВИЗНАЧЕННЯ ГОТОВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ БАГАТОКРАТНИМ ЗАМІЩУВАЛЬНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

**Анотація.** Розглянуто визначення функцій інтенсивності потоку відмов та готовності для відновлюваних електромеханічних систем із багатократним заміщувальним резервуванням. Аналіз ґрунтується на складанні структурно-алгоритмічних моделей систем, подальшому їх перетворенні до моделей станів та подій, а потім до розрахункових дискретно-неперервних стохастичних моделей марковського типу.

**О. Ю. Лозинский**, д-р техн. наук,  
**С. В. Щербовский**, канд. техн. наук

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОТОВНОСТИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МНОГОКРАТНЫМ ЗАМЕСТИТЕЛЬНОЙ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

**Аннотация.** Рассмотрено определение функций интенсивности потока отказов и готовности для восстанавливаемых электромеханических систем с многократным замещающим резервированием. Анализ основывается на составлении структурно-алгоритмических моделей систем, дальнейшем их превращении в модели состояний и событий, а затем к расчетным дискретно-непрерывным стохастическим моделям марковского типа.

**O. U Lozynsky**, Doctor of Technical Sciences, Prof.  
**S. V Shherbovskij**, ScD

### DETERMINING THE READINESS OF RENEWABLE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH MULTIPLE REDUNDANT ZAMISCHUVALNYM

**Abstract.** Failure intensity and availability determination for renewal electromechanical systems with sliding redundancy is treated. Such analysis is based on creating structure & algorithm models, further they transformation to state & event models, and then to calculable Markov type discrete & continuous models.

**Постановка проблеми.** Один із способів підвищення надійності електромеханічних систем є застосування заміщувального резервування, що полягає у введенні надлишкових, стосовно мінімального необхідних для функціонування системи, елементів, які у випадку відмови основного елемента беруть на виконання його функції. Визначення характеристик надійності для відновлюваних систем ґрунтується на складанні та опрацюванні дискретно-неперервних стохастичних моделей. Під час аналізу систем із багатократним заміщувальним резервуванням виявляється, що процес формування дискретно-неперервних моделей набагато складніший і трудомісткіший, ніж подальший їх розрахунок, який здійснюємо стандартними засобами прикладних математичних пакетів. Таким чином, постає проблема розробки методів для ефективної автоматизованої побудови моделей надійності систем досліджуваного типу.

У практичному аспекті результати дослідження можуть бути використані для підвищення показників надійності електромеханічних систем, а у теоретичному є основою для подальшого розвитку методів автоматизації марковського аналізу.

**Аналіз останніх досліджень.** Для визначення характеристик готовності систем виділяємо два основні підходи: марковський аналіз [1, 2] у прямій чи опосередкованій формі, та імітаційне моделювання [4]. Недолік підходу описаного в [2] полягає в тому, що він направлений на визначення лише стаціонарних значень готовності. Цей недолік усунуто в [1], проте © Лозинський О. Ю., Щербовських С. В., 2011

не розглянуто випадок, якщо розподіли напрацювання відмінні від експоненціальних, як це має місце для електромеханічних систем. Основна складність імітаційних моделей [4] полягає у спотворенні результатів флуктуаціями, пов'язаними із застосуванням генератора випадкових чисел, та велика тривалість обчислень порівняно із марковським аналізом. Загальною проблемою обох підходів є відсутність ефективних методів для автоматизованого складання моделей.

**Постановка завдань.** Сформувати структурно-алгоритмічні моделі та визначити за ними функції готовності та інтенсивності потоку відмов відновлюваних систем із багатократним заміщувальним резервуванням.

**Викладення основного матеріалу.** Вважаємо, що система складена із  $N$  елементів (рис. 1а), де елемент 1 основний, а решта  $2-N$  — резервні.

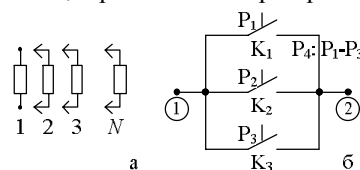


Рис. 1. Блок-схема (а) та структурна схема (б) надійності системи

Для формалізованого опису на основі блок-схеми сформуємо її структурну схему (рис. 2,б), що містить множину перемикачів  $K$ , станом яких керують процеси використання  $P$ . Приймаємо, що у системі протікають процеси використання (напрацювання)  $P_1-P_N$

елементів  $1-N$ , тривалості яких розподілені за канонічними законами фазового типу із параметрами  $\lambda$  та  $p(0)$ , та процес загального ремонтування системи  $P_{N+1}$ , тривалість якого розподілена за експоненціальним розподілом із параметром  $\mu$ . Система зберігає працездатність поки хоча б один із її елементів працездатний. Навантаження елемента, який виконує функцію основного постійне і не залежить від станів інших елементів, тому швидкість протікання процесу його використання приймаємо рівною одиниці. Навантаження та швидкість використання решти працездатних елементів, які перебувають у резерві, вважаємо рівними нулю. Заміщення елементів виконуємо у порядку їх нумерування, тобто спочатку вмикаємо елемент 2, далі – 3 і т. д. до останнього  $N$ . Ремонтнування полягає у одночасній заміні усіх непрацездатних елементів на нові. Визначення характеристик надійності системи включає виконання таких етапів. Формалізація опису системи у вигляді структурно-алгоритмічної моделі, перетворення її у модель станів і подій, а тоді за нею сформування та обчислення дискретно-неперервної стохастичної моделі марковського типу. Структурно-алгоритмічна модель встановлює взаємозв'язок між процесами, які протікають у системі, її структурою та алгоритмом використання і ремонтування. Приклад такої моделі для системи із двократним заміщувальним резервуванням дивись у таблиці.

1. Структурно-алгоритмічна модель відновлюваної системи із двократним заміщувальним резервуванням

№	Назва вектора	Елемент вектора	Назва параметра	Значення параметра
1.	process	process <sub>1</sub>	type	«failure»
2.			distribution	«cph»
3.			parameters	{ $\lambda_1, p_1(0)$ }
4.		process <sub>2</sub>	type	«failure»
5.			distribution	«cph»
6.			parameters	{ $\lambda_2, p_2(0)$ }
7.		process <sub>3</sub>	type	«failure»
8.			distribution	«cph»
9.			parameters	{ $\lambda_3, p_3(0)$ }
10.		process <sub>4</sub>	type	«repair»
11.			distribution	«exp»
12.			parameters	$\mu$
13.			repairset	{1, 2, 3}
14.	key	key <sub>1</sub>	process	1
15.			vertex	{1, 2}
16.		key <sub>2</sub>	process	2
17.			vertex	{1, 2}
18.		key <sub>3</sub>	process	3
19.			vertex	{1, 2}
20.	rule	state	$s = f(x, y, s_0)$	$s = s_0$
21.			$s_2 = 0 \mid x_1$	
22.			$s_3 = 0 \mid x_2$	

Модель містить три складові: вектор процесів **process**, розміщений у рядках 1–13, вектор перемикачів **key** в 14–19 та вектор правил модифікування **rule** в 20–22, кожний із яких у свою чергу містить множини параметрів для кожного із своїх елементів. Вектор

**process** означає тип, закон розподілу, параметри розподілу та множину відновлення. Параметр *type* означає тип процесу, який набуває код «failure» для процесів використання (рядки 1, 4 і 7) та «repair» для процесу ремонтування (рядок 10). Параметр *distribution* означає закон розподілу тривалості випадкового процесу, який набуває коди «cph» для канонічного розподілу фазового типу (рядки 2, 5 і 8) та «exp» для експоненціального (рядок 12). Параметри розподілу задаємо у *parameters*. Якщо задано канонічний закон фазового типу, то він містить два елементи (рядки 3, 6 і 9), а якщо експоненціальний — один (рядок 12). Для процесу ремонтування задаємо параметр **repairset**, який означає множину процесів використання  $P_1-P_3$ , які відновлюємо (рядок 13). Вектор перемикачів **key** означає тип, керуючий процес, вузли під'єднання та полярність перемикачів. Параметр *process* означає номер процесу, який керує станом перемикача. Нумерація процесів виконана згідно із порядком елементів у векторі **process**, зокрема, перемикачем  $K_1$  керує процес  $P_1$ ,  $K_2$  —  $P_2$ , а  $K_3$  —  $P_3$  (рядки 14, 16 і 18). Параметр **vertex** означає номери вхідного та вихідного вузлів до яких приєднано перемикачі, які у даній структурній схемі паралельно з'єднують вузли 1 та 2 (рядки 15, 27 і 19). Також існує параметр *type*, який задає тип перемикача: нормально замкнений чи розімкнений, а також логічний параметр *directed*, який визначає полярність перемикача. Для систем із багатократним заміщувальним резервуванням усі перемикачі є неполярні нормально розімкнені, тому ці параметри у таблиці не задані у явній формі. Вектор правил **rule**, який може складатись із функцій *state()* та *event()*, означає правила модифікування моделі. Оскільки в системі є лише зміна навантаження елементів, то застосовуємо функцію *state()*, яка означає вектор швидкостей протікання процесів  $s$  залежно від логічного-алгебричного вектора статусу процесів  $x$ , логічного вектора працездатності  $y$  та вектора  $s_0$ , визначеного за стандартними правилами. Розмірність та порядок елементів у векторах  $s$ ,  $x$  та  $s_0$  узгоджена із вектором **process**. Вектор  $s_0$  визначаємо згідно із такими правилами. 1. Якщо статус процесу активний, то швидкість його протікання становить одиницю, а інакше — нуль. 2. Якщо стан системи непрацездатний, то швидкість протікання усіх процесів використання (код «failure») становить нуль. 3. Якщо статус процесу ремонтування (код «repair») активний, то швидкість протікання цього процесу дорівнює одиниці, якщо хоча б один процес, вказаний у множині відновлення (**repairset**), має пасивний статус; в усіх інших випадках швидкість процесу дорівнює нулю. Для досліджуваної системи задаємо дію стандартних правил (рядок 20), а потім корегуємо їх на відсутність навантаження у режимі резервування. Зокрема, якщо логіко-алгебричний аргумент  $x_1$  вказує на працездатність елемента 1, то елемент 2 перебуває у ненавантаженому резерві (рядок 21). Якщо працездатний елемент 2, то навантаження елемента 3 теж відсутнє (рядок 22).

На другому етапі формуємо модель станів та подій, яка встановлює взаємозв'язок між станами, в яких перебуває система, і подіями, що відбуваються у системі, у проекційному зв'язку із процесами. Параметр

рами станів є інформація про швидкості протікання процесів, а параметрами подій – інформація про процеси, які завершуються та розпочинаються у сусідніх станах. Автоматизоване перетворення структурно-алгоритмічної моделі у модель станів та подій передбачає пряме комбінаторне перебирання станів, застосування правил модифікування швидкості протікання процесів, ідентифікацію подій, застосування правил модифікування стандартних подій та видалення недовсяжних станів і подій на основі алгоритму Флойда-Уоршелла. Розмірність моделі процесів та подій нерезервованої системи становить 2 процеси, 2 стани та 2 події (2/2/2), системи із однократним резервуванням 3/3/4, із двократним 4/4/6, а з трикратним 5/5/8. Для кожної системи побудовано діаграми станів та переходів і доведена їх достовірність.

Третій етап передбачає формування та опрацювання моделі марковського типу, яка встановлює взаємозв'язок між фазами та переходами системи, а також зв'язок фаз та переходів із характеристиками надійності. Параметрами фаз є початкова ймовірність, а переходів – інтенсивність. Автоматизоване перетворення моделі станів та подій у модель марковського типу виконуємо на основі трансформації фактичних розподілів процесів до розподілів фазового типу. Порядок фазового розподілу вибираємо залежно від бажаної точності результату, а також ступеня впливу цього процесу на характеристики системи у цілому. Вираз початкового розподілу неважливий і може бути заданий композиційним розподілом, кусково-лінійною апроксимацією або безпосередньо статистичними даними. У дослідженні усі процеси на початку задані розподілами фазового типу. Далі застосовуємо багатократне тензорне множення та узагальнене додавання моделей розподілів фазового типу згідно заданих правил [3]. Опрацювання моделей марковського типу виконуємо стандартними методами чисельного інтегрування з адаптивним кроком для жорстких диференціальних рівнянь. Розмірність моделі марковського типу нерезервованої системи становить 6 фаз, системи із однократним резервуванням 27, із двократним 108, а з трикратним 405. Достовірність отриманих результатів перевірено застосуванням імітаційного моделювання. Криві функції інтенсивності потоку відмов системи  $z(t)$  подані на фрагменті рис.2,а, функції готовності системи  $A(t)$  – на фрагменті рис.2,б.

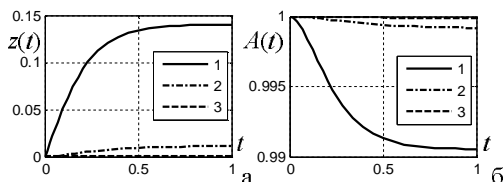


Рис.2. Криві характеристик готовності системи

На обох фрагментах рис. 2 звичайні криві відповідають відновлюваній системі із однократним, штрих-пунктирні – із двократним, а штрихові криві – із трикратним заміщувальним резервуванням. Як видно із рис.2 при збільшенні кратності резервування стаціонарне значення функції інтенсивності потоку

відмов асимптотично спадає до нуля, а готовності прямує до одиниці.

**Висновки.** У дослідженні дана кількісна оцінка впливу кратності резервування на функцію інтенсивності потоку відмов та готовності для відновлюваних систем, а також показані закономірності формування структурно-алгоритмічних моделей для відновлюваних електромеханічних систем із багатократним заміщувальним резервуванням. Результати отримані на основі застосування розроблених авторами методів для автоматизованого перетворення компактної і зручної у складанні формальної структурно-алгоритмічної моделі у модель марковського типів, яку безпосередньо розраховуємо. Застосування таких методів суттєво пришвидшило аналіз надійності систем, оскільки формування та подальший аналіз станів і подій, а також їх розщеплення на фази і переходи виконано обчислювальною машиною. Подальші дослідження скеровані на визначення характеристик надійності відновлюваних систем із розгалуженою структурною схемою, зокрема енергетичних, комп'ютерних та теплових мереж.

#### Список використаної літератури

1. Мандзій Б. А. Програмні моделі для інтерактивного проектування відмовостійких систем з комбінованим структурним резервуванням та врахуванням стратегій їх технічного обслуговування / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський // Компютерінг. – 2008. – Т. 7. – № 1. – С. 153-163.
2. Alexander A. Hagin. Reliability evaluation of repairable network with limited capacity and structural redundancy / Alexander A. Hagin // Microelectronics and Reliability. – Vol. 37. – No 2. – 1997. – P. 341-347.
3. Shcherbovskykh S. V. Failure Intensity Determination for System with Standby Doubling / S. V. Shcherbovskykh, O. Yu. Lozynsky, Ya. Yu. Marushchak // Electrical Review. – 2011. – 87. – No 5. – P. 160-162.
4. Veber B. Generalized Renewal Process for Repairable Systems Based on Finite Weibull Mixture / B. Veber, M. Nagodea, M. Fajdiga // Reliability Engineering and System Safety. – 2008. – Vol. 93. № 10. – P. 1461-1472. Отримано 09.06.2011



Лозинський  
Орест Юліанович,  
д-р техн. наук, зав. каф. електроприводу та автоматизації промислових установок Нац. ун-ту «Львівська політехніка»,  
E-mail: olozynsky@lp.edu.ua



Щербовських  
Сергій Володимирович,  
канд. техн. наук., докторант каф. електроприводу та автоматизації промислових установок Нац. ун-ту «Львівська політехніка»,  
E-mail: shcherbov@lp.edu.ua