

РОЗРАХУНОК БЕЗВІДМОВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ ЗА СХЕМОЮ 2-НА-1

Введення. З метою підвищення показників надійності електромеханічних об'єктів використовують паралельне резервування, яке також відоме у літературі як пасивне резервування. Таке резервування утворюють встановленням разом із основним об'єктом кількох резервних, які виконують аналогічні функції паралельно із основним. У випадку відмови одного із об'єктів справність усієї системи забезпечується рештою справних. Звичайно приймають припущення, що після відмови одного із елементів перерозподілу навантаження не відбувається. Для малопотужних систем, які оперують інформаційними сигналами, таке припущення виявляється цілком справедливим. Для силових систем, які оперують потоками енергії, наприклад, електромеханічні та електроенергетичні системи, таке припущення часто виявляється неприйнятним.

Побудова моделей надійності, які адекватно описують вплив перерозподілу навантаження на показники безвідмовності електромеханічних систем є актуальною науковою проблемою. Важливим аспектом таких моделей надійності є здатність коректно оперувати довільними моделями відмов (законами розподілу) складових елементів, тобто враховувати їх попереднє напрацювання.

Розв'язання цієї проблеми, з практичної точки зору, забезпечить підвищення точності розрахунку показників безвідмовності електромеханічних та електроенергетичних об'єктів, а відповідно оптимізує витрати на створення резервів. З теоретичної точки зору розробка математичних моделей надійності для аналізу показників безвідмовності є підґрунтям для розробки моделей об'єктів з урахуванням відновлення.

Аналіз останніх досліджень. Для розв'язання поставленої проблеми у літературі можна виділити два основних методи. Один метод ґрунтується на застосуванні звичайних Марковських моделей надійності, а інший – на основі методу згортки. У статті [1] використовують звичайні однорідні Марковські моделі надійності для відображення перерозподілу навантаження після зміни структури об'єкта. Недолік звичайних однорідних Марковських моделей надійності полягає у тому, що усі процеси напрацювання та ремонту повинні описуватись експоненціальними моделями відмов та відновлення. Для об'єктів, в яких реальні характеристики відрізняються від експоненціального розподілу, а в їх числі є електромеханічні та електроенергетичні об'єкти [2], адекватність звичайної однорідної Марковської моделі погіршується. Інший метод розв'язання даної проблеми ґрунтується на застосуванні методу згортки [3]. Для досліджуваного у статті об'єкта імовірність безвідмовної роботи визначають згідно такої формули:

$$R(t) = R_1^2(t) + 2 \int_0^t f_1(\tau) R_1(\tau) R_2(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

де $R_1(t)$, $f_1(t)$ – імовірність безвідмовної роботи та густина розподілу відмов елементів системи до перерозподілу навантаження; $R_2(t)$ – імовірність безвідмовної роботи елементів системи після перерозподілу навантаження; t , τ – час розрахунку та проміжна змінна інтегрування, яка відповідає часу перерозподілу навантаження.

Основний недолік методу полягає в тому, що застосування добутку $R_1(\tau) R_2(t - \tau)$ є некоректним, оскільки для елементів системи, модель відмов яких не є експоненціальними, напрацювання після перерозподілу навантаження залежить від напрацювання до перерозподілу навантаження. Формула (1), отримана на основі методу згортки, у загальному випадку дає неточний результат.

Задачею дослідження є побудова розширеної однорідної Марковської моделі надійності системи, яка адекватно описуватиме явище перерозподілу навантаження за схемою з двох елементів на один елемент.

Матеріали дослідження. Об'єктом дослідження є модель надійності електромеханічної системи із загальним паралельним дублюванням. Після відмови одного із елементів системи інший, справний, бере на себе усе навантаження і далі працює за двох. Такий об'єкт, з точки зору надійності, складається з двох однакових елементів. Алгоритм функціонування досліджуваної системи такий. Спочатку система перебуває у справному стані, який позначимо S_2 . У такому стані обидва елементи справні і перебувають під заданим навантаженням. Напрацювання елементів системи під таким навантаженням характеризують функцією імовірності безвідмовної роботи $R_1(t)$. Внаслідок відмови одного із елементів об'єкт переходить у стан, який позначатимемо S_1 . У справному стані S_1 один із елементів є несправним і відключеним від схеми, а інший – справним і перебуває під подвійним навантаженням. Вважаємо, що процес перерозподілу навантаження відбувається миттєво, а засоби контролю та технічної діагностики ідеальні. Напрацювання елемента системи в режимі подвійного навантаження характеризують функцією імовірності безвідмовної роботи $R_2(t)$. Внаслідок відмови другого елемента системи об'єкт переходить у стан, який позначатимемо S_0 . У несправному стані S_0 обидва елементи системи є

несправними. Цей стан об'єкта є фінішним – у ньому жодні процеси не відбуваються. Таким чином, в об'єкті відбувається умовне перемикання зі схеми, в якій навантаження розподілено однаково між обома елементами, на схему, в якій навантаження повністю покладено на один елемент. Зауважимо, що напрацювання елементів в режимі подвійного навантаження *залежить* від їх напрацювання в режимі заданого навантаження.

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи об'єкта виконаємо з використанням Марковської моделі надійності на основі розширення простору станів [4]. Для того, щоб виконати розрахунок цим методом, характеристики усіх випадкових процесів напрацювання повинні бути апроксимовані фазовими законами розподілу (*phase-type distribution*) [5]. Для досліджуваного об'єкта приймаємо, що функції імовірності безвідмовної роботи обох елементів системи є канонічними фазовими розподілами третього порядку:

$$R(t) = \left(1 + (c_2 + c_3) \lambda t + c_3 \frac{\lambda^2 t^2}{2} \right) \exp(-\lambda t),$$

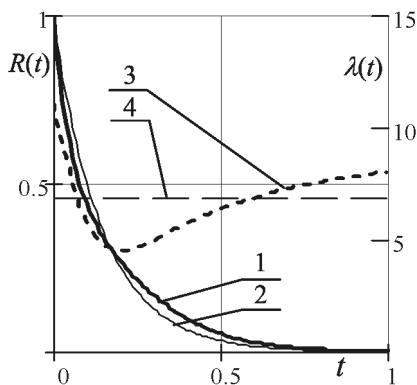
де c_2, c_3, λ , а також $c_1 = 1 - c_2 + c_3$ – параметри закону розподілу.

Модель відмов елементів об'єкта, щоб відображати перерозподіл навантаження, повинна узгоджуватись із такими положеннями:

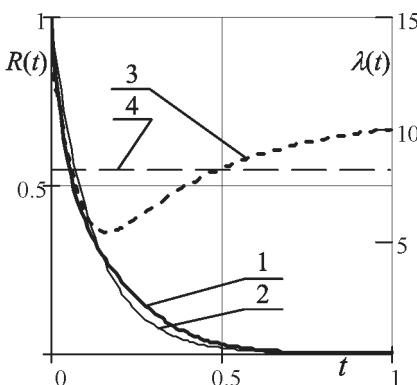
- форма кривої функції імовірності безвідмовної роботи об'єкта при різних навантаженнях є незмінною;
- зміна навантаження спричиняє лише зміну масштабу осі часу для функції імовірності безвідмовної роботи.

Приймаємо, що параметри моделі відмов є такими: $c_2 = -0.7$ (відн. од.), $c_3 = 0.6$ (відн. од.). В режимі заданого навантаження приймаємо, що $\lambda = \lambda_1 = 10$ (1/відн. од. часу), а в режимі подвійного навантаження $\lambda = \lambda_2 = 15$ (1/відн. од. часу). З метою збереження форми кривої розподілу для усіх режимів навантаження порядок закону розподілу та значення коефіцієнтів c_2, c_3 залишаються незмінними. З метою зміни масштабу часу, для різних режимів навантаження, параметр λ повинен набувати зазначених вище значень.

Для порівняння результатів, отриманих шляхом розрахунку звичайної однорідної Марковської моделі надійності та Марковської моделі надійності на основі розширення простору станів, знайдемо параметри відповідних експоненціальних моделей відмов.



а) – режим заданого навантаження



б) – режим подвійного навантаження

Рис.1. Криві імовірнісних характеристик моделей відмов елементів системи

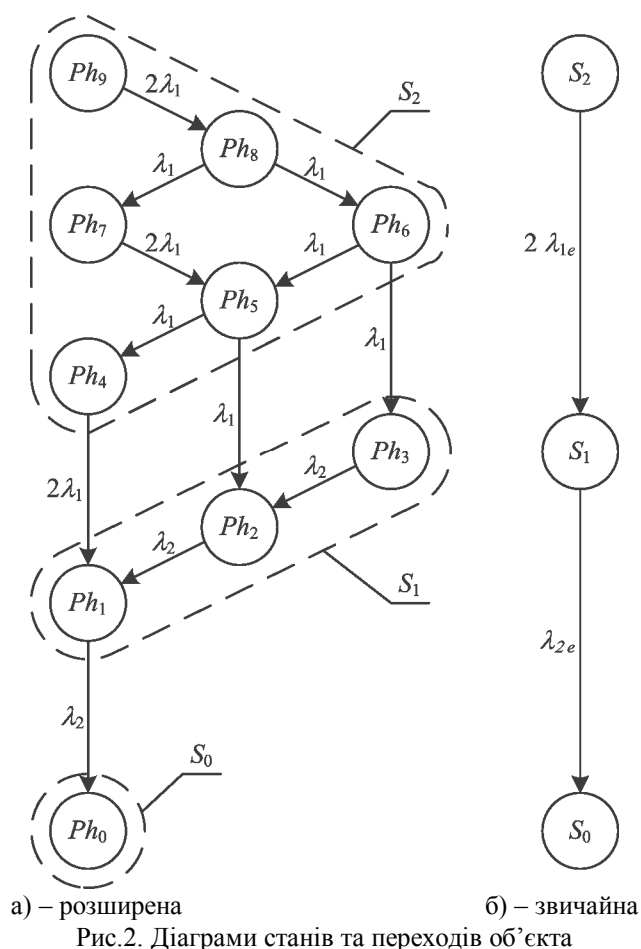
Параметр для режиму заданого навантаження визначаємо шляхом апроксимації функції імовірності безвідмовної роботи на основі фазового розподілу (рис.1.а, крива 1) функцією імовірності безвідмовної роботи на основі експоненціального розподілу (рис.1.а, крива 2). Відповідно для режиму подвійного навантаження – функції (рис.1.б, крива 1) функцією (рис.1.б, крива 2). Значення параметрів, при якому забезпечується найменша середньоквадратична похибка, для першого випадку $\lambda_{1e} = 6.837$ (1/відн. од. часу), а для другого – $\lambda_{2e} = 10.255$ (1/відн. од. часу). Таким чином, графікам функції інтенсивності відмов (рис.1.а та б, криві 3), які є нелінійними, поставлені у відповідність постійні інтенсивності відмов λ_{1e} та λ_{2e} (рис.1.а та б, криві 4).

Розширену однорідну Марковську модель надійності об'єкта формуємо на основі правил, які наведено у [4]. В результаті застосування зазначених правил та виконання процедури спрощення простору станів отримуємо розширену діаграму станів та переходів (рис.2.а). Згідно із отриманою моделлю надійності, імовірність безвідмовної роботи об'єкта є сумою функцій імовірностей фаз, які відповідають справності об'єкта $Ph_1 \dots Ph_9$.

Наближений розрахунок імовірності безвідмовної роботи досліджуваного об'єкта можна виконати, ґрунтуючись на звичайній однорідній Марковській моделі надійності. У діаграмі станів та переходів такої моделі (рис.2.б) функції інтенсивності переходів між станами замінені еквівалентними константами λ_{1e} та λ_{2e} , які були визначені вище. Така заміна означає, що дійсні моделі відмов об'єкта замінено (згідно вибраного критерію) експоненціальними моделями відмов. На основі отриманої моделі надійності, імовірність безвідмовної роботи об'єкта є сумою функцій ймовірностей станів, які відповідають справності досліджуваного об'єкта S_1 та S_2 .

На рис.3 наведено результати розрахунку моделей надійності досліджуваної системи: за однорідною Марковською моделлю

надійності на основі розширення простору станів, яка запропонована у даній статті (рис.3, крива 1, суцільна потовщена лінія), за звичайною однорідною Марковською моделлю надійності (рис.3, крива 2, суцільна лінія) та за моделлю надійності, сформованою на основі методу згортки (рис.3, крива 3, пунктирна потовщена лінія).



Криві імовірності безвідмовної роботи об'єкта, побудовані на основі звичайної однорідної Марковської моделі надійності (рис.3, крива 2) та моделі надійності, сформованої за методом згортки (рис.3, крива 3) внаслідок покладених припущень, описують дійсну характеристику безвідмовності наближено. Крива 2 на початковому часовому інтервалі проходить вище за криву 1, а на кінцевому – нижче. Крива 3 на всьому часовому інтервалі проходить нижче за криву 1, проте сумарна похибка результату $I_{13} = 0.39$ у порівнянні із кривою 2 $I_{12} = 0.65$ є меншою.

Висновки. Проведені подальші дослідження крайових випадків, наприклад, $\lambda_1 = \lambda_2$, дозволяють припустити, що крива 1, яка отримана на основі запропонованої у статті моделі надійності, у порівнянні із кривими, отриманими іншими методами, найкраще наближається до дійсного результату. Результати, отримані на основі моделі надійності за методом згортки і за класичною Марковською моделлю на прикінцевому інтервалі часу, є заниженими, проте, в цілому, описують загальну тенденцію характеристики безвідмовності. Застосовувати класичну Марковську модель для початкового інтервалу часу некоректно, оскільки отримані результати є суттєво завищені.

Подальші дослідження скеровані на розробку моделей надійності на основі методу Монте-Карло та Марковських моделей надійності на основі розширення простору станів для розрахунку показників надійності відновлюваних систем з перерозподілом навантаження.

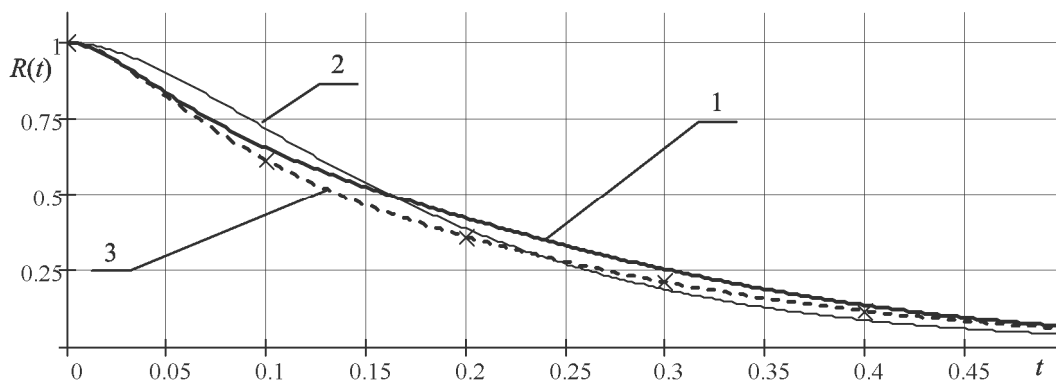


Рис.3. Криві функцій імовірності безвідмовної роботи об'єкта

Література

1. Dugan, J.B., Yong Ou. Approximate sensitivity analysis for acyclic Markov reliability models // IEEE Transactions on Reliability. – 2003. – Vol. 52, No. 2. – P.220- 230.
2. Zhang, X., Gockenbach, E. Assessment of the Actual Condition of the Electrical Components in Medium-Voltage Networks // IEEE Transactions on Reliability. – 2006. – Vol. 55, No. 2. – P.361- 368.
3. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1988. – 208с.
4. Лозинський О.Ю., Щербовських С.В. Побудова моделей надійності ремонтваних електромеханічних об'єктів на основі розширення простору станів // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". – 2005. – №45. – С.74-81.

5. Лозинський О.Ю, Щербовських С.В. Визначення ефективної підмножини фазових законів розподілу для утворення математичних моделей надійності ремонтованих об'єктів // Відбір і обробка інформації. – 2004. – №21(97). – С.17-22.

**Lozynsky O.Yu., Saharchuk T.M.
Shcherbovskykh S.V.**

**Ukraine,
Lviv**

Lviv Polytechnic National University

**RELIABILITY CALCULATION OF LOAD TRANSFER ELECTROMECHANICAL
SYSTEM BY 2-ON-1 SCHEMA**

In the paper synthesis technique for electromechanical system both whole parallel redundancy and load transfer by 2-on-1 schema is presented. State space extension for reliability model creating is used. This reliability model operate by arbitrary failure model that phase-type distribution can be approximated.

Лозинський О.Ю., Сахарчук Т.М. Щербовських С.В.

Розрахунок безвідмовності електромеханічної системи з перерозподілом навантаження за схемою 2-на-1.

В статті подано спосіб побудови моделі надійності електромеханічної системи із загальним паралельним резервуванням та з перерозподілом навантаження за схемою 2-на-1. Дана модель надійності сформована на основі розширення простору станів і здатна оперувати довільними моделями відмов, які можна апроксимувати розподілами фазового типу.

Ключові слова: безвідмовність, Марковська модель надійності, розширення простору станів.

Лозинский О.Ю., Сахарчук Т.Н. Щербовских С.В.

Расчет безотказности электромеханической системы с перераспределением нагрузки по схеме 2 на 1.

В статье представлен способ построения модели надежности электромеханической системы с общим параллельным резервированием, а также с перераспределением нагрузки по схеме 2-на-1. Данная модель надежности сформирована на основе расширения пространства состояний и способна оперировать любыми моделями отказов, которые можно аппроксимировать фазовыми распределениями.

Ключевые слова: безотказность, Марковская модель надежности, расширение пространства состояний.

Lozynsky O.Yu., Saharchuk T.M. Shcherbovskykh S.V.

Reliability calculation of load transfer electromechanical system by 2-on-1 schema

In the paper synthesis technique for electromechanical system both whole parallel redundancy and load transfer by 2-on-1 schema is presented. State space extension for reliability model creating is used. This reliability model operate by arbitrary failure model that phase-type distribution can be approximated.

Keywords: reliability, Markov reliability model, state space extension.