tts

TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO

Andrzej MACIEJCZYK, Zbigniew ZDZIENNICKI

WSPÓŁCZYNNIK GOTOWOŚCI SYSTEMU LOKOMOTYW SPALINOWYCH SERII SM48

Streszczenie

W artykule wyznaczono współczynniki gotowości systemu dla różnych układów eksploatacji spalinowych lokomotyw serii SM48. Współczynniki gotowości systemu wyznaczono stosując aparat procesów Markowa.

WSTĘP

Lokomotywy serii SM48 (rys. 1) służą do wykonywania ciężkich prac manewrowych oraz pracy liniowej. Obecnie lokomotywy te, oprócz użytkowania w PKP i obsługi bocznic przemysłowych, są wykorzystywane również w przewozach koncesyjnych prywatnych przewoźników.

Lokomotywy serii SM48 to obiekty oczywiście naprawialne i do określenia niezawodności systemów złożonych z tych lokomotyw wykorzystano analizę opartą na procesach Markowa, [1], [2], [3]. W prezentowanej pracy ograniczono się do wyznaczenia współczynnika gotowości systemu jako parametru najbardziej istotnego w praktyce eksploatacyjnej tych obiektów.

Wyznaczono statyczne współczynniki gotowości następujących systemów tych lokomotyw:
- system pracujący bez rezerwy,
- system pracujący z rezerwą „gorącą” jednej lokomotywy,
- system pracujący z rezerwą „zimną” jednej lokomotywy.

Wielkości parametrów niezawodnościowych dla jednej lokomotywy serii SM48 zaczerpnięto z pracy [4]. Wielkości te są następujące:
- oczekiwany czas pracy lokomotywy pomiędzy uszkodzeniami

$$ET = 386 \ \ [\text{godz.}]$$

- oczekiwany czas odnowy lokomotywy

$$QT = 5{,}7 \ \ [\text{godz.}]$$

A zatem, intensywność uszkodzeń lokomotywy wynosi:

$$\lambda = \frac{1}{ET} = 0{,}0026 \ \ [1/\text{godz.}] \tag{1}$$

I dalej, intensywność odnowy lokomotywy wynosi:

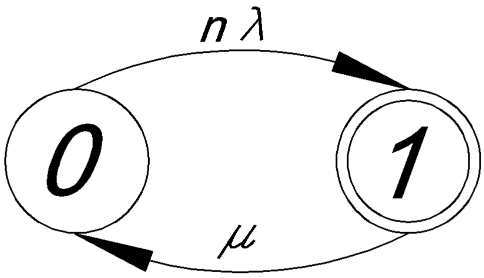
$$\mu = \frac{1}{QT} = 0{,}175 \quad [1/\text{godz.}] \tag{2}$$

Rys. 1. Lokomotywa spalinowa serii SM48 – zdjęcie pozyskane z Internetu

1. SYSTEM ZŁOŻONY Z *n* LOKOMOTYW BEZ REZERWY

Założono, że system składa się z *n* jednakowych niezawodnościowo lokomotyw i praca ich wszystkich zabezpiecza wykonanie zadania przez system. Ponadto zakłada się, że w procesie naprawczym może znajdować się tylko jeden obiekt, a sam proces naprawy następuje natychmiast po dysfunkcji lokomotywy.

Przy tych założeniach stany niezawodnościowe systemu są następujące:
0 - wszystkie *n* lokomotyw jest sprawnych; stan sprawności systemu,
1 - przynajmniej jedna lokomotywa jest niesprawna; stan niesprawności systemu.
Graf stanów systemu i przejść pomiędzy nimi przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Graf systemu bez rezerwy

Na podstawie powyższego grafu można napisać następującą macierz przejść czyli tzw. macierz Markowa:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} -n\lambda & n\lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix} \tag{3}$$

Macierz transponowana do powyższej macierzy jest macierzą współczynników równań Kołmogorowa – Chapmana:

$$\boldsymbol{Q_T} = \begin{bmatrix} -n\lambda & \mu \\ n\lambda & -\mu \end{bmatrix} \tag{4}$$

Równania Kołmogorowa – Chapmana mają postać:

$$\begin{aligned} -n\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0 \\ n\lambda P_0 - \mu P_1 &= 0 \\ P_0 + P_1 &= 1 \end{aligned} \tag{5}$$

gdzie:
P_0 – prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie sprawności,
P_1 - prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie niesprawności.

Rozwiązując powyższy układ równań (jedno z równań jednorodnych należy usunąć) otrzymuje się:

$$P_1 = \frac{n \cdot \lambda}{\mu + n \cdot \lambda} \tag{6}$$

Współczynnik gotowości systemu, to prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie/stanach poza stanem niesprawności, czyli:

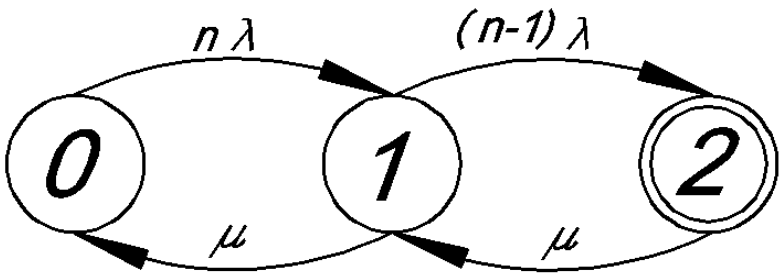
$$K = 1 - P_1 = 1 - \frac{n \cdot \lambda}{\mu + n \cdot \lambda} \tag{7}$$

2. SYSTEM ZŁOŻONY Z *n* LOKOMOTYW Z REZERWĄ „GORĄCĄ"

W tym przypadku dokonana zostaje następująca modyfikacja systemu: do zabezpieczenia wykonania zadania potrzebnych jest *(n-1)* lokomotyw; *n*-ta lokomotywa tworzy tzw. rezerwę „gorącą" tzn. używana jest do prac pomocniczych i w każdej chwili może zastąpić uszkodzoną lokomotywę wykonującą postawione przed systemem zadanie. Pozostałe założenia są takie same jak poprzednio.

Przy tych założeniach stany niezawodnościowe systemu są następujące:
0 - wszystkie *n* lokomotyw jest sprawnych, *(n-1)* lokomotyw wykonuje zadanie postawione przed systemem, a jedna lokomotywa, wykonując prace dodatkowe/pomocnicze, jest w rezerwie „gorącej"; stan sprawności systemu,
1 - jedna lokomotywa jest niesprawna – system pracuje bez rezerwy; stan sprawności systemu,
2 - przynajmniej dwie lokomotywy są niesprawne; stan niesprawności systemu.

Graf stanów systemu i przejść pomiędzy nimi przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Graf systemu z rezerwą „gorącą”

Na podstawie powyższego grafu można napisać następującą macierz przejść czyli tzw. macierz Markowa:

$$Q = \begin{bmatrix} -n\lambda & n\lambda & 0 \\ \mu & -[\mu + (n-1)\lambda] & (n-1)\lambda \\ 0 & \mu & -\mu \end{bmatrix} \tag{8}$$

Macierz transponowana do powyższej macierzy ma postać:

$$Q_T = \begin{bmatrix} -n\lambda & \mu & 0 \\ n\lambda & -[\mu + (n-1)\lambda] & \mu \\ 0 & (n-1)\lambda & -\mu \end{bmatrix} \tag{9}$$

a równania Kołmogorowa – Chapmana:

$$\begin{aligned} -n\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0 \\ n\lambda P_0 - [\mu + (n-1)\lambda]P_1 + \mu P_2 &= 0 \\ (n-1)P_1 - \mu P_2 &= 0 \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1 \end{aligned} \tag{10}$$

gdzie:
P_0, P_1 – prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanach sprawności,
P_2 - prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie niesprawności.

Rozwiązując powyższy układ równań (jedno z równań jednorodnych należy usunąć) otrzymuje się:

$$P_2 = \frac{n(n-1)\lambda^2}{\mu^2 + n\lambda\mu + n(n-1)\lambda^2} \tag{11}$$

Współczynnik gotowości systemu to prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanach poza stanem niesprawności, czyli:

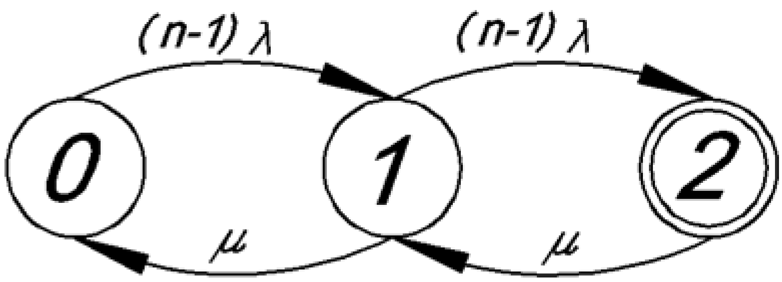
$$K = 1 - P_2 = 1 - \frac{n(n-1)\lambda^2}{\mu^2 + n\lambda\mu + n(n-1)\lambda^2} \tag{12}$$

3. SYSTEM ZŁOŻONY Z *n* LOKOMOTYW Z REZERWĄ „ZIMNĄ”

W tym przypadku dokonana zostaje następująca modyfikacja systemu: do zabezpieczenia wykonania zadania potrzebnych jest *(n-1)* lokomotyw; *n*-ta lokomotywa tworzy tzw. rezerwę „zimną” tzn. nie pracuje i w każdej chwili może zastąpić uszkodzoną lokomotywę wykonującą postawione przed systemem zadanie. Zakłada się, że lokomotywa pozostając w rezerwie „zimnej” (nie pracując) nie ulega uszkodzeniu. Pozostałe założenia są takie same jak poprzednio.

Przy tych założeniach stany niezawodnościowe systemu są następujące:
0 - wszystkie *n* lokomotyw jest sprawnych, *(n-1)* lokomotyw wykonuje zadanie postawione przed systemem, a jedna lokomotywa jest w rezerwie „zimnej”; stan sprawności systemu,
1 - jedna lokomotywa jest niesprawna – system pracuje bez rezerwy; stan sprawności systemu,
2 - przynajmniej dwie lokomotywy są niesprawne; stan niesprawności systemu.

Graf stanów systemu i przejść pomiędzy nimi przedstawia rys. 4.



Rys.4. Graf systemu z rezerwą ”zimną”

Na podstawie powyższego grafu można napisać następującą macierz przejść czyli tzw. macierz Markowa:

$$Q = \begin{bmatrix} -(n-1)\lambda & (n-1)\lambda & 0 \\ \mu & -[\mu + (n-1)\lambda] & (n-1)\lambda \\ 0 & \mu & -\mu \end{bmatrix} \tag{13}$$

Macierz transponowana do powyższej macierzy ma postać:

$$Q_T = \begin{bmatrix} -(n-1)\lambda & \mu & 0 \\ (n-1)\lambda & -[\mu + (n-1)\lambda] & \mu \\ 0 & (n-1)\lambda & -\mu \end{bmatrix} \tag{14}$$

a równania Kołmogorowa – Chapmana:

$$\begin{aligned} -(n-1)\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0 \\ (n-1)\lambda P_0 - [\mu + (n-1)\lambda]P_1 + \mu P_2 &= 0 \\ (n-1)P_1 - \mu P_2 &= 0 \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1 \end{aligned} \tag{15}$$

gdzie:
P_0, P_1 – prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanach sprawności,
P_2 - prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie niesprawności.

Rozwiązując powyższy układ równań (jedno z równań jednorodnych należy usunąć) otrzymuje się:

$$P_2 = \frac{\lambda^2(n-1)^2}{\mu^2+(n-1)\lambda\mu+\lambda^2(n-1)^2} \tag{16}$$

Współczynnik gotowości systemu to prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanach poza stanem niesprawności, czyli:

$$K = 1 - P_2 = 1 - \frac{\lambda^2(n-1)^2}{\mu^2+(n-1)\lambda\mu+\lambda^2(n-1)^2} \tag{17}$$

4. ZESTAWIENIE I OMÓWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Przy wykorzystaniu wielkości (1) i (2) zostały obliczone z zależności (7), (12) i (17) współczynniki gotowości systemów eksploatacji lokomotyw serii SM48: bez rezerwy, z rezerwą „gorącą" i z rezerwą „zimną". Obliczenia przeprowadzono dla różnych wielkości parametru *n* – ilości lokomotyw w systemie. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Współczynniki gotowości systemów lokomotyw spalinowych serii SM48

Ilość lokomotyw w systemie *n*	Współczynnik gotowości systemu		
	Bez rezerwy	Z rezerwą „gorącą"	Z rezerwą „zimną"
2	0.971	1	1
3	0,957	0,999	0,999
4	0,944	0,998	0,998
5	0,931	0,996	0,997
6	0,918	0,994	0,995
7	0,906	0,992	0,993
8	0,894	0,989	0,990
9	0,882	0,986	0,988
10	0,871	0,983	0,984

Analizując wyniki zestawione w tabeli 1 można zauważyć, że systemy złożone z lokomotyw spalinowych serii SM48 w ilości 7-miu sztuk i mniej, bez rezerwy, mają współczynnik gotowości większy niż 0,9. Zatem, w wielu przypadkach praktycznych, taka struktura eksploatacji tych lokomotyw będzie zupełnie zadawalająca. Co więcej, przeznaczenie w tych układach jednej lokomotywy jako rezerwy zwiększa współczynnik gotowości systemu jedynie o kilka procent, a pociąga za sobą relatywnie bardzo wysokie koszty.

Począwszy od liczby lokomotyw *n* = 8, zastosowanie jednej lokomotywy w rezerwie zwiększa w istotny sposób współczynnik gotowości systemu - o wartość rzędu 10% , w stosunku do systemu pracującego bez rezerwy. Zastosowanie w rozpatrywanej strukturze lokomotywy rezerwowej może być już opłacalne, zwłaszcza że jednocześnie relatywnie zmaleje koszt takiej rezerwy.

Dalsze analizy wyników zamieszczonych w tabeli 1 prowadzą do kolejnego wniosku. Wielkość współczynnika gotowości systemu w rozważanych układach lokomotyw serii SM48 praktycznie nie zależy od rodzaju zastosowanej rezerwy – „gorącej” czy „zimnej”. Jest to wskazówka, by lokomotywę rezerwową wykorzystywać do prac pomocniczych, np. prac manewrowych, w systemach eksploatacji tych obiektów.

PODSUMOWANIE

Wyznaczono współczynniki gotowości systemów utworzonych z lokomotyw spalinowych serii SM48 eksploatowanych bez i z rezerwą jednej lokomotywy. Rozważono rezerwę „gorącą” i rezerwę „zimną”. Przedstawiony sposób uogólnia rozważane systemy do *n* sztuk lokomotyw eksploatowanych w systemie. Do wyznaczenia współczynników gotowości użyto matematycznego aparatu procesów Markowa. Otrzymane wyniki obliczeń zestawiono i omówiono.

AVAILABILITY FOR THE SYSTEMS OF SM48 DIESEL LOCOMOTIVES

Abstract

The paper presents availability for the systems of SM48 diesel locomotives. There was used Markov analysis to solve the problem.

BIBLIOGRAFIA

1. Birolini A., *Reliability Engineering. Theory and Practice*, 4-th Ed. Springer 2003.
2. Fuqua N. B., *Markov Analysis.* The Journal of the Reliability Analysis Center, Third Quarter-2003, pp. 11-19.
3. Trivedi K. S.: *Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications.* John Wiley & Sons, Second Ed. 2011.
4. Szkoda M., *Analiza niezawodności lokomotywy spalinowej serii SM48.* Logistyka 3/2012.

Autorzy:

dr inż. Andrzej MACIEJCZYK– Politechnika Łódzka; Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

dr inż. Zbigniew ZDZIENNICKI– Politechnika Łódzka; Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn