

Mieczysław Kornaszewski

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu

MODELOWANIE PROCESU EKSPLOATACYJNEGO URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Rękopis dostarczono, kwiecień 2019

Streszczenie: Podstawowym przeznaczeniem urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk) jest zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa poruszających się pociągów po sieci kolejowej. Urządzenia srk pracują często w trudnych warunkach środowiskowych i są narażone na działanie zakłóceń zewnętrznych. Okoliczności te wymagają ciągłej analizy stanu systemu srk. Wraz z upływem czasu następuje pogarszanie się stanu technicznego systemu srk. Gdy jego stan techniczny nie jest zadowalający konieczne staje się jego obsługiwanie i odnowa jego stanu użytkowania.

Racjonalna realizacja zadań eksploatacyjnych systemu srk pozwala na wprowadzenie do badań eksploatacyjnych metod modelowania matematycznego. Wykorzystując model matematyczny procesu eksploatacji możliwe jest prognozowanie wskaźników niezawodnościowych poszczególnych obiektów systemu sterowania ruchem kolejowym. Znajomość parametrów eksploatacyjnych powinna być wykorzystana przy podejmowaniu decyzji w procesie zarządzania eksploatacją urządzeń srk.

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem kolejowym, proces eksploatacji, model

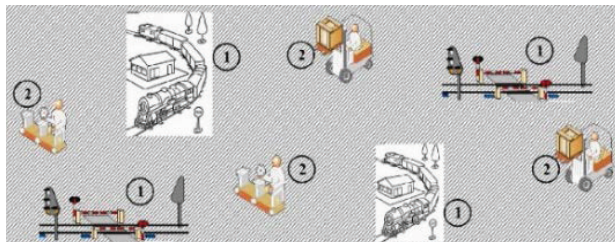
1. WSTĘP

Głównym zadaniem urządzeń sterowania ruchem kolejowym, pracujących w zróżnicowanych warunkach eksploatacji, jest zapewnienie bezpiecznego i sprawnego ruchu pojazdów kolejowych. Ciągły wzrost bezpieczeństwa przewozu osób i ładunków oraz zapewnienie wymaganej sprawności ruchu wpływają na rosnące wciąż wymagania dotyczące niezawodności urządzeń srk. Zastosowanie na polskich kolejach złożonych systemów srk (różnych technologicznie i funkcjonalnie) powoduje potrzebę analizy i oceny ich działania, współdziałania oraz prognozowania skutków eksploatacyjnych wynikających z wdrażania tych systemów [2], [7], [8].

W systemowym podejściu eksploatacja systemu sterowania ruchem kolejowym obejmuje przestrzennie ukształtowany zbiór elementów techniczno-organizacyjnych (rys. 1), sterujących procesem ruchu kolejowego w celu bezpiecznego i sprawnego przewozu osób i ładunków wraz z metodami i środkami zapewniającymi odpowiednią gotowość techniczną

[2], [6], [7], [11]. W eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym i tworzących go urządzeń można wyróżnić dwa podstawowe stany:

1. Użytkowanie, określające jego oddziaływanie (oraz jego podzespołów) na procesy ruchu kolejowego z wykorzystaniem środków organizacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym.
2. Obsługiwanie, określające zbiór metod i środków technicznych służących utrzymaniu gotowości technicznej urządzeń sterowania ruchem kolejowym.



Rys. 1. Przykład eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym w ujęciu przestrzennym, gdzie: 1 – zbiór stanowisk użytkowania urządzeń srk, 2 – zbiór stanowisk obsługi urządzeń srk
Źródło: opracowanie własne.

W przypadku eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym należy odnieść się do całokształtu czynności, jakie należy wykonać od momentu ich wyprodukowania, tak aby utrzymać je w ciągłej gotowości do pracy przez możliwie najdłuższy czas. Czynności te powinny prowadzić do zapewnienia jak największej niezawodności urządzeń oraz zabezpieczenia odpowiedniej ich obsługi.

W fazie eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym zachodzą różnorodne procesy, a w szczególności: użytkowania, zużycia (starzenia) urządzenia i jego podzespołów, diagnozowania [10], prognozowania stanów urządzeń srk, obsługiwanie, przetwarzania, przechowywania i przedstawiania informacji, zarządzania eksploatacją itp. [2], [11], [12].

Użytkowanie urządzeń srk wpływa na zmianę ich własności fizyko-chemicznych oraz ich podzespołów, co powoduje m.in. przechodzenie urządzenia w stan niezdatności. Odnowa potencjału eksploatacyjnego i odtworzenie stanu zdatności urządzenia odbywa się poprzez realizację procesu obsługi.

2. MODEL PROCESU EKSPLOATACJI SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Właściwie przygotowany i dobrany model procesu eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym wymusza potrzebę opracowania następujących zagadnień:

- określenia stanu technicznego systemu srk i jego obiektów,
- opisu procesu zmian stanów technicznych występujących w systemie srk,
- opisu procesu zmian stanów eksploatacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym.

2.1. ZAŁOŻENIA DO MODELOWANIA PROCESU EKSPLOATACJI SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Modelowanie procesu eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym należy wykonać przy następujących założeniach [2], [7], [8], [12]:

- rozpatrywany system srk jest systemem odnawialnym o odpowiednio długim czasie działania, średni czas poprawnej pracy pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami systemu jest krótszy niż czas eksploatacji,
- przyjmuje się, że system jest po okresie adaptacji a przed okresem starzenia się (krzywa wannowa intensywności uszkodzeń),
- systemy srk będą wykonane w technologiach elektrycznej, hybrydowej lub komputerowej,
- prawdopodobieństwo wystąpienia dwóch lub więcej uszkodzeń jednocześnie jest bliskie zero,
- pominięto problem kosztów odnowy i przyjęto, że są one stałe.

3. PROCES EKSPLOATACJI SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Stan obiektu wynika z jego przeszłości, a znajomość stanu jest potrzebna do ustalenia zachowania się obiektu w przyszłości. Stan obiektów technicznych jest uwarunkowany czynnikami konstrukcyjnymi i czynnikami technologicznymi. Podczas eksploatacji działają różnorodne czynniki zewnętrzne (np. wymuszenia meteorologiczne, biologiczne, mechaniczne, kwalifikacje użytkowników, itp.), a także czynniki wewnętrzne (np. wielkości nacisków jednostkowych, rodzaje ruchu). Czynniki te mają charakter losowy, co sprawia, że zbiór cech opisujących właściwości obiektów w danej chwili ma również charakter losowy [3], [4], [5].

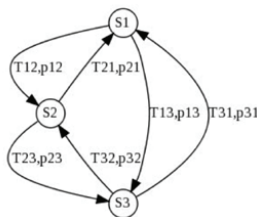
System sterowania ruchem kolejowym jest systemem złożonym. Niezależnie od spełniającej funkcji systemu srk (nastawnice kolejowe, blokady liniowe, przejazdy kolejowo-drogowe, urządzenia zdalnego sterowania, urządzenia oddziaływania tor-pojazd, itp.) ma on strukturę hierarchiczną i występuje w nim wiele podzespołów. Układy zależnościowe mają zasadniczy wpływ na niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania systemu sterowania ruchem kolejowym. Uszkodzenia tych układów należą do grupy uszkodzeń, które najtrudniej jest usunąć i które powodują w konsekwencji największe straty. Ponadto stanowią znaczną część wszystkich uszkodzeń w każdym systemie srk, niezależnie od jego przeznaczenia funkcjonalnego. W podzespołach systemów srk wykonanych w różnych technologiach rozwijanych na przestrzeni ostatnich lat (mechaniczne, elektromechaniczne, przekazywnikowe, hybrydowe, mikroprocesorowe) mogą wystąpić uszkodzenia wynikające z procesów fizyczno-chemicznych zachodzących w tych obiektach (zużycie, korozja, zmęczenie, starzenie itp.). Do przyczyn powodujących przedwczesne zużycie i powstawanie uszkodzeń należy zaliczyć m.in.: wady montażowe i technologiczne, nadmierne i długotrwałe

obciążenie (cieplne, mechaniczne), nieodpowiedni dobór (na etapie projektowania) materiałów elementów układów silnikowych (napędy zwrotnicowe, napędy rogatek) – tzw. zużycie tribologiczne (spowodowane procesami tarcia), ekstremalne warunki użytkowania, zmienność parametrów obciążenia, niewłaściwy dobór parametrów użytkowania (elektrycznych, mechanicznych, cieplnych), czy zakłócenia pochodzenia elektrycznego (np. przepięcia z zewnętrznych źródeł zasilania), pochodzenia elektromagnetycznego (np. oddziaływania innych urządzeń, taboru i trakcji elektrycznej).

Wraz z upływem czasu (w czasie użytkowania) następuje pogarszanie się stanu technicznego systemu srk. W przypadku, gdy stan techniczny systemu lub jego podzespołów nie jest zadowalający należy, przed rozpoczęciem odpowiedniego działania, przeprowadzić obsłużenie w celu odnowy jego stanu zdadności (użytkowania). W przeciwnym razie użytkownik (nastawniczy, dyspozytor) musi zgodzić się na ograniczone (niepełne) funkcjonowanie, a nawet na zupełną rezygnację z jego działania. Racjonalna realizacja zadań eksploatacyjnych systemu srk wymaga wprowadzenia do badań metod modelowania matematycznego.

3.1. PROCES ZMIAN STANÓW TECHNICZNYCH SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Proces zmian stanów technicznych urządzeń systemu sterowania ruchem kolejowym w ujęciu matematycznym jest funkcją odwzorowującą zbiór chwil T w zbiór stanów technicznych S . W praktyce eksploatacyjnej w procesie decyzyjnym mogą być wykorzystane tylko modele rzeczywistych procesów zmian stanów systemu srk. Modelami tymi są procesy stochastyczne o dyskretnym zbiorze stanów i ciągłym czasie trwania wyróżnionych stanów [1], [3], [4], [5], [6], [12].



Rys. 2. Graf zmian stanów technicznych systemu sterowania ruchem kolejowym, gdzie:
 S_1 – stan pełnej zdadności; S_2 – stan zdadności częściowej (ograniczonej); S_3 – stan niezdadności;
 p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu S_i do stanu S_j ; T_{ij} – czas trwania stanu S_i pod warunkiem przejścia procesu do stanu S_j , $i, j = \overline{1,3}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4], [7], [12]

Procesy zachodzące w czasie użytkowania i obsłużenia systemu srk powodują, że:

- 1) stan techniczny systemu srk zmienia się w sposób ciągły, co oznacza, że przechodząc od jednego stanu do drugiego przechodzi przez nieskończenie wiele stanów pośrednich,
- 2) każdy z wyróżnionych stanów (możliwych do zidentyfikowania ze stanami wzorcowymi tzw. diagnostycznymi) może zaistnieć w dowolnej chwili t czasu eksploatacji,

3) w dowolnej chwili t system srk może znajdować się w różnym lub identycznym stanie technicznym.

Proponowany model zmian stanów technicznych urządzeń tworzących system srk praktycznie użyteczny przedstawiono na rysunku 2 [4], [6], [7], [12].

Stan S_1 identyfikowany jest jako stan, w którym wszystkie parametry pracy obiektu technicznego są zgodne z założonymi, natomiast S_2 jest stanem, w którym obiekt oczekuje na wykonanie swoich zadań.

Zbiór stanów technicznych S w przypadku systemu sterowania ruchem kolejowym jest następujący:

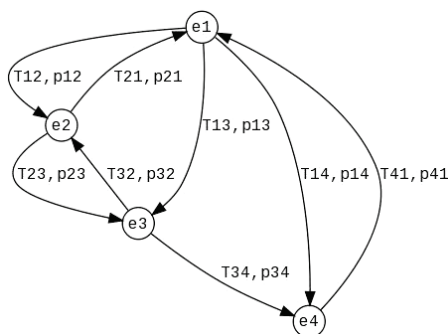
- S_1 – urządzenia srk są sprawne i pracują zgodnie ze swoim przeznaczeniem – stan pełnej zdadności,
- S_2 – system spełnia swoje funkcje (pracuje w ograniczonym zakresie), ale niektóre urządzenia srk (struktury z redundancją) są wyłączone – stan zdadności częściowej,
- S_3 – system srk jest wyłączony (nie pracuje) – stan niezdatności.

3.2. PROCES ZMIAN STANÓW EKSPLOATACYJNYCH SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Proces zmian stanów eksploatacyjnych systemu srk w okresie międzyobsługowym jest podobnie jak proces zmian stanu technicznego, rozpatrywany w praktyce eksploatacyjnej jako proces losowy o dyskretnym zbiorze stanów i ciągłym czasie trwania wyróżnionych stanów. Formalnie, proces ten jest uporządkowanym ciągiem zmiennych losowych $\{X(t): t \in T\}$ określonych na wspólnej przestrzeni probabilistycznej i o wartościach w ustalonej przestrzeni mierzalnej [4], [7], [12].

Do określenia kolejności występowania stanów eksploatacyjnych pomocny jest graf eksploatacyjny, który określa zasady przejścia między wyróżnionymi stanami eksploatacyjnymi (elementami bazy) obiektu. Graf eksploatacyjny obiektu jest grafem skierowanym, w którym wierzchołkami są stany eksploatacyjne, a łukami możliwe przejścia między stanami. Porządek eksploatacyjny określa kolejność występowania stanów eksploatacyjnych.

Proces zmian stanów eksploatacyjnych urządzeń wchodzących w skład systemu sterowania ruchem kolejowym w ujęciu matematycznym jest funkcją odwzorowującą zbiór chwil T w zbiór stanów eksploatacyjnych E . Model zmian stanów eksploatacyjnych urządzeń systemu srk został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Graf stanów eksploatacyjnych urządzeń tworzących system sterowania ruchem kolejowym w okresie międzyobsługowym, gdzie: T_{jk} – czas trwania stanu e_j pod warunkiem przejścia procesu do stanu e_k ; p_{jk} – prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu e_j do stanu e_k ; $j, k = \overline{1, 4}$, e_1 – użytkowanie aktywne, e_2 – użytkowanie pasywne, e_3 – obsługiwane planowe, e_4 – obsługiwane nieplanowane.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4], [7], [12]

Zbiór stanów eksploatacyjnych (stanów użytkowania i obsługiwanego) urządzeń systemu sterowania ruchem kolejowym jest następujący:

- e_1 – praca systemu srk zdanego – użytkowanie aktywne urządzeń tworzących system srk,
- e_2 – urządzenia systemu srk są zdane, ale system znajduje się w stanie kontroli stanów (nie spełnia swojego przeznaczenia) – użytkowanie pasywne (stan braku działania w czasie zdadności, kiedy to działanie nie jest potrzebne),
- e_3 – obsługa profilaktyczna systemu srk (przeгляд okresowy urządzeń i podzespołów systemu sterowania ruchem kolejowym) – obsługiwane planowe,
- e_4 – odnowa zdadności urządzeń systemu srk – obsługiwane nieplanowane.

Analiza grafu stanów z rysunku 3.

Zdatny system znajdujący się w stanie użytkowania aktywnego e_1 (realizacja usługi bezpiecznego i sprawnego procesu transportowego osób i ładunków) może po czasie T_{12} przejść do stanu e_2 oznaczającego użytkowanie pasywne (oczekiwanie zdane na realizację zadania przewozowego z możliwością autokontroli stanów systemu). Prawdopodobieństwo takiego przejścia wynosi p_{12} . Zdarzają się sytuacje, że stan użytkowania e_1 trwający T_{13} kończy się obsługą profilaktyczną (planowaną) elementu lub urządzenia, które wymaga dużego nakładu pracy i wówczas system przechodzi do stanu e_3 , oznaczającego odnowę profilaktyczną. Prawdopodobieństwo takiego przejścia wynosi p_{13} . W przypadku, gdy stan użytkowania e_1 kończy się uszkodzeniem, którego usunięcie nie jest pracochłonne i nie było planowane, to wówczas system po czasie T_{14} przechodzi do stanu obsługiwanego nieplanowego (bieżącego) e_4 oznaczającego efektywną naprawę uszkodzenia. Natomiast długotrwałe przebywanie w stanie e_1 może spowodować wystąpienie uszkodzenia (np. starzenie się podzespołów systemu srk), którego usunięcie wymaga dodatkowych przedsięwzięć obsługowych (oczekiwania na części zamienne, oczekiwania na specjalistyczną aparaturę obsługową, itp.) i powoduje przejście do stanu e_3 oznaczającego obsługiwane planowane [7].

Podobną analizę można przeprowadzić dla pozostałych stanów eksploatacyjnych ze zbioru stanów $\{e_1 \div e_6\}$ systemu sterowania ruchem kolejowym.

4. MODELOWANIE PROCESU EKSPLOATACJI SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Zbiór stanów technicznych $S \in \{S_1, S_2, S_3\}$ można uważać za zbiór wartości procesu losowego $\{W(t): t \in T\}$. Podobnie zbiór stanów eksploatacyjnych $E \in \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ można uważać za zbiór wartości procesu losowego $\{X(t): t \in T\}$. Procesy $\{W(t): t \in T\}$ i $\{X(t): t \in T\}$ są procesami wzajemnie zależnymi. Opisanie procesu $Y(t)$ wymaga znalezienia jego łącznego rozkładu. Wobec tego należy rozpatrywać proces dwuwymiarowy $\{Y(t): t \in T\}$, którego składowymi są procesy losowe $W(t)$ oraz $X(t)$ [1], [4], [7], [8], [12]

$$Y(t) = [W(t), X(t)], \text{ gdzie } t \in T \quad (1)$$

Analiza zależności procesów $W(t)$ i $X(t)$ dotyczących systemu sterowania ruchem kolejowym odbywających się w tym samym czasie t_i :

- $\{W(t): t \in T\}$ – proces losowy zawierający zbiór stanów technicznych systemu srk,
 $\{X(t): t \in T\}$ – proces losowy zawierający zbiór stanów eksploatacyjnych systemu srk,
 $\{Y(t): t \in T\}$ – proces losowy zawierający łączny zbiór stanów techniczno-eksploatacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym.

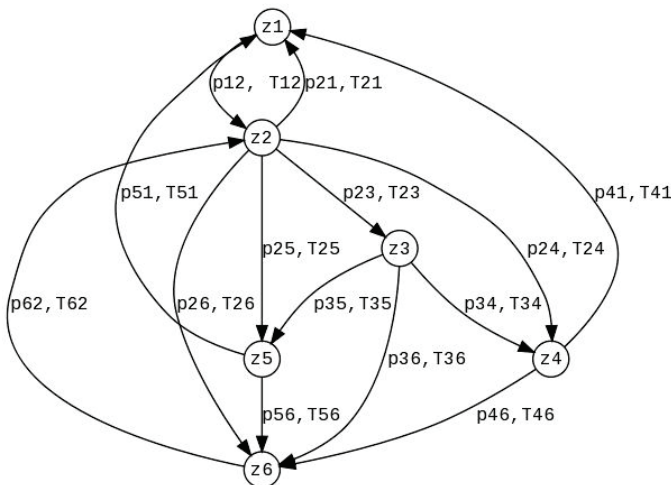
Proces eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym jest łącznym procesem jednoczesnych zmian stanów technicznych (wchodzących w skład zbioru S) i stanów eksploatacyjnych (należących do zbioru E) tego systemu. Jednoczesne uwzględnienie zbioru stanów technicznych systemu srk $S = \{S_1, S_2, S_3\}$ i zbioru stanów eksploatacyjnych tego systemu $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ umożliwia utworzenie następującego zbioru stanów techniczno-eksploatacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym [4], [7], [12]

$$Z = S \times E = \{(s_1, e_1), (s_1, e_2), (s_1, e_3), (s_1, e_4), (s_2, e_1), (s_2, e_2), (s_2, e_3), (s_2, e_4), (s_3, e_1), (s_3, e_2), (s_3, e_3), (s_3, e_4)\}, \quad (2)$$

gdzie:

- $z_1 = (s_1, e_1)$ – urządzenia systemu srk są w stanie pełnej zdatności i system jest w stanie użytkowania aktywnego (pełnego),
 $z_2 = (s_1, e_2)$ – urządzenia systemu srk są w stanie pełnej zdatności, ale system znajduje się w stanie kontrolnym tzw. użytkowania pasywnego,
 $z_3 = (s_1, e_3)$ – urządzenia systemu srk są w stanie pełnej zdatności, ale system przechodzi obsługę profilaktyczną,
 $z_4 = (s_1, e_4)$ – urządzenia systemu srk są w stanie pełnej zdatności i mimo to muszą przejść obsługę nieplanowaną,
 $z_5 = (s_2, e_1)$ – system srk jest w stanie zdatności ograniczonej i występuje użytkowanie aktywne tych urządzeń,
 $z_6 = (s_2, e_2)$ – system srk jest w stanie zdatności częściowej i znajduje się w stanie kontroli stanów (użytkowania pasywnego),
 $z_7 = (s_2, e_3)$ – system srk jest w stanie zdatności częściowej i podlega obsłudze planowemu (profilaktyczne),
 $z_8 = (s_2, e_4)$ – system srk jest w stanie zdatności częściowej i podlega obsłudze nieplanowanemu,
 $z_9 = (s_3, e_1)$ – system srk jest w stanie niezdatności, ale system pracuje i znajduje się w stanie użytkowania aktywnego,
 $z_{10} = (s_3, e_2)$ – urządzenia systemu srk są w stanie niezdatności i system przebywa w użytkowaniu pasywnym,
 $z_{11} = (s_3, e_3)$ – system srk jest w stanie niezdatności i następuje obsługa profilaktyczna,
 $z_{12} = (s_3, e_4)$ – system srk jest w stanie niezdatności i następuje obsługa nieplanowana.

Z przedstawionych rozważań wynika, że zbiór Z jest zbiorem stanów techniczno-eksploatacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym $Z = \{z_i, i = 1, 2, \dots, 12\}$, które upraszczając można nazywać stanami eksploatacyjnymi. Pewna liczba tych stanów nie ma możliwości zaistnienia, a niektóre zachodzą bardzo rzadko. Do pierwszego podzbioru stanów o prawdopodobieństwie zajścia równym zero zalicza się stany: z_4 , z_9 i z_{10} , natomiast do drugiego podzbioru stanów, którym można przypisać prawdopodobieństwo bliskie zeru zalicza się stany z_3 , z_6 i z_7 . Należy zatem rozpatrywać proces eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym o ograniczonym zbiorze stanów: $Z^\# = \{z_1^\#, z_2^\#, z_3^\#, z_4^\#, z_5^\#, z_6^\#\}$, przy czym po pominięciu stanów praktycznie niemożliwych do zaistnienia ($P=0$, $P \approx 0$) przyjęto: $z_1^\# = z_2^\#$; $z_2^\# = z_1^\#$; $z_3^\# = z_5^\#$; $z_4^\# = z_8^\#$; $z_5^\# = z_{11}^\#$; $z_6^\# = z_{12}^\#$. Numeracja w tym ograniczonym zbiorze stanów eksploatacyjnych uwzględnia prawdopodobieństwa ich występowania.



Rys. 4. Graf ograniczonych stanów eksploatacyjnych systemu sterowania ruchem kolejowym w okresie międzyobsługowym, gdzie: T_{ij} - czas trwania stanu z_i pod warunkiem przejścia procesu do stanu z_j ; p_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu z_i do stanu z_j ; dla $i \neq j$; $i, j = \overline{1,6}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4], [7], [12]

Łączny rozkład prawdopodobieństwa dwuwymiarowego procesu eksploatacji systemu srk można przedstawić w następującej postaci

$$p(s_k, e_m, t) = P\{W(t)=s_k, X(t)=e_m\}, \text{ gdzie } t \in T \quad (3)$$

Proces eksploatacji systemu srk $\{Y(t): t \in T\}$ jest semimarkowskim procesem ciągłym w czasie. Proces ten jest również procesem o skończonym zbiorze stanów, nieprzywydlnym i o zmiennych losowych $T_j (j = \overline{1,6})$, które mają skończone dodatnie wartości oczekiwane $E(T_j)$. Oznacza to, że istnieje rozkład graniczny tego procesu [1], [3], [5], [7].

Jeśli proces semi-Markowa $\{X(t): t \in R_+\}$; $t \in R$ o skończonym zbiorze stanów W jest nieprzywydlny oraz zmienne losowe T_j ; przy $j \in W$ mają skończone dodatnie wartości oczekiwane $E(T_j)$, to istnieją graniczne prawdopodobieństwa przejścia [5], [9], [12]

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{ij}(t); \quad i, j \in W \quad (4)$$

$$P_{ij} = P_j = \frac{p_j^* \cdot E(T_j)}{\sum_{k \in W} p_k^* \cdot E(T_k)} \quad (5)$$

gdzie: p_j^* - prawdopodobieństwa graniczne (ergodyczne) włożonego łańcucha Markowa.

Graf przedstawiony na rys. 4 jest grafem skierowanym, na bazie którego można zbudować model matematyczny procesu eksploatacji systemu sterowania ruchem kolejowym. Uzyskano następujące równania stanów granicznych [4], [6], [7], [12]

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1^* = p_{21} \cdot p_2^* + p_{41} \cdot p_4^* + p_{51} \cdot p_5^* \\ p_2^* = p_{12} \cdot p_1^* + p_{62} \cdot p_6^* \\ p_3^* = p_{23} \cdot p_2^* \\ p_4^* = p_{24} \cdot p_2^* + p_{34} \cdot p_3^* \\ p_5^* = p_{25} \cdot p_2^* + p_{35} \cdot p_3^* \\ p_6^* = p_{26} \cdot p_2^* + p_{36} \cdot p_3^* + p_{46} \cdot p_4^* + p_{56} \cdot p_5^* \end{array} \right. \quad (6)$$

Warunek normalizacyjny na następującą postać

$$p_1^* + p_2^* + p_3^* + p_4^* + p_5^* + p_6^* = 1 \quad (7)$$

W przypadku dyskretnego charakteru zmian stanu eksploatacyjnego systemu sterowania ruchem kolejowym podstawowym narzędziem opisu łańcucha Markowa jest stochastyczna macierz prawdopodobieństw przejść o postaci

$$P_{ij}(t) = \begin{bmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46} \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{56} \\ 0 & p_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} p_{12} = 1 \\ p_{21} + p_{23} + p_{24} + p_{25} + p_{26} = 1 \\ p_{34} + p_{35} + p_{36} = 1 \\ p_{41} + p_{46} = 1 \\ p_{51} + p_{56} = 1 \\ p_{62} = 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

Prawdopodobieństwo p_{ij} przedstawionej macierzy oznacza prawdopodobieństwo zaistnienia przejścia systemu srk do stanu j po upływie określonego czasu T_{ij} przy założeniu, że znajdował się on w stanie i na początku tego czasu.

Rozwiązując układ równań (6) można określić prawdopodobieństwa graniczne p_i^* przebywania systemu srk w wyróżnionych stanach eksploatacyjnych $z_1 - z_6$, natomiast wykorzystując zależność (5) i przyjmując, że średnie wartości oczekiwane czasów przebywania systemu srk w wyróżnionych stanach $E(T_i), i = \overline{1,6}$ są skończone i dodatnie a łańcuch Markowa $\{Y(\tau_z): z = 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ posiada jedną ergodyczną klasę, można wyznaczyć prawdopodobieństwa p_i przebywania systemu srk w wyróżnionych stanach [4], [7], [12].

5. WNIOSKI

Modelowanie matematyczne jest szczególnie przydatne w zastosowaniach technicznych do sterowania układem, w szczególności w systemach czasu rzeczywistego oraz do przeprowadzenia analizy zachowania się takiego układu. Model matematyczny odpowiada grupie funkcji wiążących ze sobą różne zmienne i w ten sposób opisujących powiązania między wybranymi wielkościami w układzie. Ten rodzaj modelowania może być wykorzystany do modelowania procesu eksploatacyjnego urządzeń sterowania ruchem kolejowym.

Modelowanie procesu eksploatacyjnego systemu sterowania ruchem kolejowym ma wiele zalet. Stanowi jedną z alternatywnych dróg do podnoszenia niezawodności tego systemu. Możliwe staje się prognozowanie parametrów eksploatacyjnych i wskaźników niezawodnościowych obiektów sterowania ruchem kolejowym, które mają wpływ na kształtowanie procesu eksploatacyjnego systemu srk.

Model procesu eksploatacyjnego systemu srk może spełniać wiele funkcji, m.in.: odwzorowywać zmienność procesów użytkowania i obsługiwanie, stanowić narzędzie pozwalające wyznaczyć wartości wskaźników jakościowych przebiegu modelowanego procesu (współczynnik jednoczesności przebiegów pociągowych, prawdopodobieństw uszkodzenia między przebiegami pociągowymi, itp.), stanowić narzędzie dla kształtowania strategii eksploatacyjnej i oceny decyzji eksploatacyjnych.

Przedstawione w artykule wskaźniki niezawodnościowe charakteryzujące własności procesu eksploatacyjnego systemu sterowania ruchem kolejowym powinny być uwzględnione w modelu decyzyjnym przydatnym do planowania procesu eksploatacyjnego tego systemu.

Bibliografia

1. Chrzan M., Kornaszewski M., Ciszewski T.: Renovation of Marine Telematics Objects in the Process of Exploitation. Management Perspective for Transport Telematics. Communications in Computer and Information Science, Volume 897. Springer Nature Switzerland AG 2018, pp. 337–351, 2018.
2. Dyduch J., Moczarski J.: Podstawy eksploatacji systemów sterowania ruchem kolejowym. Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, 2015.
3. Girtler J.: Application of semi-Markov processes for evaluation of diesel engines reliability with regards to diagnostics. Journal of Polish CIMEAC, No 1, vol. 11/2016, pp. 47-53, 2016.
4. Girtler J.: Stochastyczny model procesu eksploatacji okrętowego silnika spalinowego. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 2, s. 79-88, 1989.
5. Grabski F.: Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Seria: Badania Systemowe, tom 30, Polska Akademia Nauk, IBS, Warszawa 2002.
6. Kierzkowski A.: Model procesu eksploatacji obiektu technicznego. AUTOBUSY Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe Nr 3(159), Instytut Naukowo-Wydawniczy SPATIUM, Radom 2013.
7. Kornaszewski M.: Modelowanie odnowy systemów sterowania ruchem kolejowym w procesie eksploatacji. Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, 2013.
8. Kornaszewski M., Pniowski R.: Prognozowanie niezawodności urządzeń sterowania ruchem kolejowym z wykorzystaniem metod symulacyjnych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej TRANSPORT z. 113, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 241-253, Warszawa 2016.
9. Limnios, N., Oprisan, G.: Semi-Markov Processes and Reliability. Statistics for Industry and Technology. Springer Science+Business Media, LCC, ISBN 978-1-4612-6640-2, Birkhauser, Boston 2001.
10. Nowakowski W., Ciszewski T., Łukasik Z.: The Concept of Railway Traffic Control Systems Remote Diagnostic, Smart Solutions in Today's Transport. Communications in Computer and Information Science, Series Volume 715, Springer International Publishing AG 2017, pp. 471-481, 2017.
11. Ważyńska-Fiok K.: Podstawy teorii eksploatacji i niezawodności systemów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
12. Żółtowski B., Niziński S.: Modelowanie procesów eksploatacji maszyn. Wydawnictwo MARKAR – BZ, Bydgoszcz-Sulejówek 2002.

MODELLING OF EXPLOITATION PROCESS OF THE RAILWAY TRAFFIC CONTROL DEVICES

Summary: The basic purpose of railway traffic control devices is to ensure a high level of safety of moving trains on the railway network. The railway traffic control devices often work in difficult environmental conditions and are exposed to external interference. These circumstances require continuous analysis of the state of the railway traffic control system. With time, the system's technical condition deteriorates. When its technical condition is not satisfactory it is necessary to operate it and renew its state of use.

The rational implementation of exploitation tasks of the railway traffic control system allows the introduction of mathematical modeling methods into exploitation tests. Using the mathematical model of the exploitation process of the railway traffic control system, it is possible to forecast e.g. reliability indicators of its individual objects. Knowledge of exploitation parameters should be used in making decisions in the process of managing the exploitation of the railway traffic control devices.

Keywords: railway traffic control, exploitation process, model