

Systemy sterowania ruchem wykorzystujące nowe technologie telematyczne

Andrzej LEWIŃSKI¹, Zbigniew ŁUKASIK², Tomasz PERZYŃSKI³,
Paweł UKLEJA⁴

Streszczenie

W artykule opisano systemy nowej generacji do kontroli i zarządzania ruchem kolejowym zwłaszcza na liniach regionalnych. Obecna infrastruktura kolejowa takich linii daje możliwość stosowania nowych technologii telematycznych, w tym otwartych standardów transmisji radiowej do sterowania i monitorowania pojazdów szynowych. Przedstawioną w artykule analizę efektywności i bezpieczeństwa oparto na procesach stochastycznych, co jest zgodne z normami i zaleceniami UE.

Słowa kluczowe: systemy srk, telematyka, bezpieczeństwo, transmisja otwarta, procesy Markowa

1. Wprowadzenie

Utrata komunikacji kolejowej (aktywnej linii kolejowej), może generować problemy gospodarcze, społeczne i demograficzne w wielu regionach i tylko ich rozwój, w tym mobilność kolejowa, może dać szansę na zahamowanie negatywnych skutków degradacji we wspomnianych aspektach. Transport kolejowy może zapewnić te wymagania i potrzeby społeczne oraz minimalizować uboczne skutki współczesnego transportu. Jest to możliwe dzięki odpowiednim założeniom dotyczącym rozwoju, rewitalizacji – odnowy regionalnych linii kolejowych, w tym zintegrowania ich z głównymi liniami kolejowymi.

Ważnym elementem takich działań jest problem bezpieczeństwa systemów. Bez względu na rodzaj linii i ich przeznaczenie, każdy system kolejowy dotyczący sterowania i zarządzania ruchem pociągów, wymaga odpowiednich certyfikatów potwierdzających bezpieczeństwo tego systemu. Codzienna eksploatacja

¹ Prof. dr hab. inż.; Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom; e-mail: a.lewinski@pr.radom.pl.

² Prof. dr hab. inż.; Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom; e-mail: z.lukasik@pr.radom.pl.

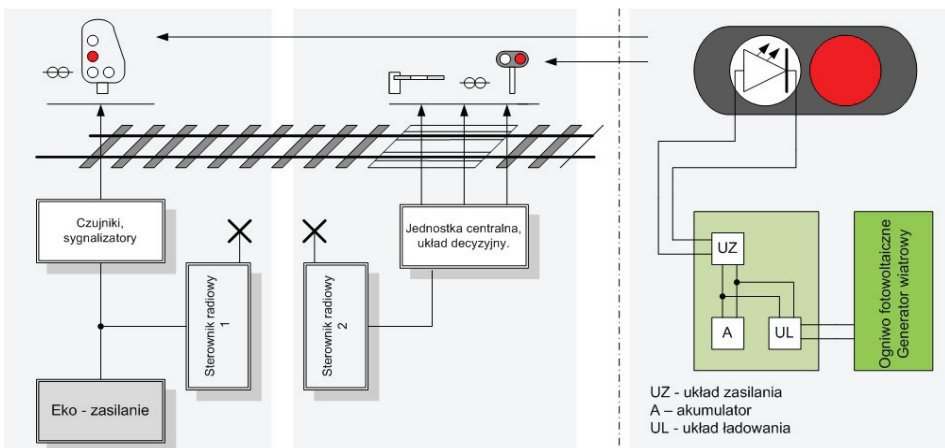
³ Dr inż.; Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Radom; e-mail: t.perzynski@pr.radom.pl.

⁴ Mgr inż.; Scheidt & Bachmann Polska Sp. z o.o; e-mail: pawel.ukleja@scheidt-bachmann.pl.

systemów *srk* wiąże się z możliwością wystąpienia uszkodzenia. Dąży się do tego, żeby w przypadku zaistnienia sytuacji niebezpiecznej doszło jedynie do zawodości systemu, a nie bezpieczeństwa. Odpowiedni poziom bezpieczeństwa może być zapewniony przez zastosowanie nowych technologii. Współczesne komputerowe systemy *srk* zapewniają ten sam poziom bezpieczeństwa, co systemy poprzedniej generacji, ponieważ są projektowane według zasady *fail-safe*. Żadna pojedyncza usterka nie może być przyczyną sytuacji niebezpiecznej, dodatkowo powinna być wykrywana w możliwie najkrótszym czasie, po którym powinna zostać zainicjowana reakcja bezpieczeństwa prowadząca do sterowania awaryjnego.

W przypadku nowych technologii przeznaczonych dla linii regionalnych, głównym problemem jest kosztowna implementacja oraz modernizacja systemów. Dotyczy ona całej infrastruktury linii kolejowej, w tym systemów łączności. W miejsce tradycyjnej komunikacji proponowane są bezprzewodowe systemy radiowe. W tym przypadku nie ma potrzeby wymiany starych przewodów, medium transmisji. Rozwiązanie oparte na łączności bezprzewodowej może być szkieletem dla nowoczesnych systemów kontroli i zarządzania związanych z lokalnym centrum sterowania (LCS), systemów liniowych w tym systemów zajętości torów, czy systemów samoczynnych sygnalizacji przejazdowych (SSP).

Innym ważnym problem jest aspekt ekologiczny i ochrona środowiska. Nowe technologie pozwalają na zastosowanie rozwiązań z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Z ekonomicznego punktu widzenia takie rozwiązania znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie duże koszty eliminują możliwość zbudowania linii potrzeb nietrakcyjnych. W takiej sytuacji energię do zasilania liniowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym można pozyskać z systemów słonecznych, wiatrowych czy hybrydowych [6]. Przykład systemu wyposażonego w proekologiczny układ zasilania oraz transmisję bezprzewodową pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Nowe technologie w systemach *srk* [oprac. własne według 6]

W artykule przedstawiono również strukturę linii regionalnej oraz modele systemów infrastruktury *srk*. Zaproponowano aparat matematyczny w postaci procesów Markowa. Podstawowa koncepcja analizy bezpieczeństwa systemów *srk* zakłada wyznaczenie tzw. RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, and Safety Software*). Do analizy bezpieczeństwa zaproponowano szacowanie dostępności (availability) systemu.

2. Struktura linii regionalnych

Regulacje dotyczące transportu kolejowego przedstawiono w [1]. Wymieniona ustawa definiuje m.in. linię kolejową i regionalne przewozy pasażerskie, ale nie definiuje jednego z elementów linii kolejowej, tzn. linii regionalnej. Autorzy sugerują, żeby wprowadzić następujące kryteria klasyfikacji linii kolejowej, w tym linii regionalnej, zależnej od czynników:

- przypisanie do kategorii pierwszej klasy lub niższej – liczba pociągów $T \geq 25$ (Tg/rok), maksymalna prędkość $V_{\max} \leq 120$ km/h (dla pociągów towarowych $V_{\max} \leq 80$ km/h),
- prędkość $V_{\max} \leq 120$ km/h zgodnie ze specyfikacją UIC,
- mieszany ruch pasażerski i towarowy,
- liczba pociągów $l_{\text{poc}} \leq 20$ (w Polsce typowa wartość to 10÷16, maksymalna 30), gdzie przynajmniej jeden z wymienionych czynników jest spełniony.

Do realizacji tych zadań jest konieczna modernizacja i zmiany, które muszą zakładać (zgodnie z zaleceniami UIC):

- maksymalne korzyści ekonomiczne w zarządzaniu ruchem kolejowym (np. zamykanie przejazdów przez kierowców pojazdów samochodowych),
- implementacja niskokosztowych rozwiązań dotyczących transmisji radiowej – maszynista, centrum dyspozytorskie, systemy liniowe (np. na bazie GSM-R).

Obecnie w Unii Europejskiej są prowadzone badania nad nowymi technologiami przeznaczonymi dla linii regionalnych. Redukcja procedur dotyczących zarządzania (z zachowaniem poziomu SIL4) może mieć wpływ na obecne procedury:

- praca bez nadzwyczajnych poleceń,
- ustawienie trasy przez maszynistów w przypadku sterowania awaryjnego,
- redukcja operacji w przypadku dwóch linii kolejowych.

W przypadku rozwiązań technicznych, redukcja reguł jest związana z:

- systemem zależnościowym w konfiguracji 2z2,
- zależnościowym pulpitem dla poziomu SIL2,
- brakiem lokalnego nadzoru (tylko LCS),

- brakiem drogi manewrowej (tylko tryb manewrowy),
- brakiem sygnału alarmowego na semaforze,
- brakiem kontroli niektórych typów punktów,
- brakiem przebiegów pociągowych bez zatrzymań po torach głównych dodatkowych,
- stosowanie liczników osi na odcinkach kolejowych i punktach.

Takie prace modernizacyjne mogą wykasować niektóre z zaleceń przypisanych danej linii, klasyfikowanej jako regionalna, lecz spełniających inne kryteria. Główny nacisk związany z automatyzacją, kontrolą i zarządzaniem dotyczy:

- automatycznego ustawienia drogi przejazdu,
- automatycznego planowania czasu z pozycji stanowiska dyspozytorskiego,
- automatycznego dokumentowania w LCS, kontroli odcinków i sąsiednich stacji,
- automatycznej współpracy z systemami informacji pasażerskiej przy użyciu otwartej transmisji (WiFi, GSM).

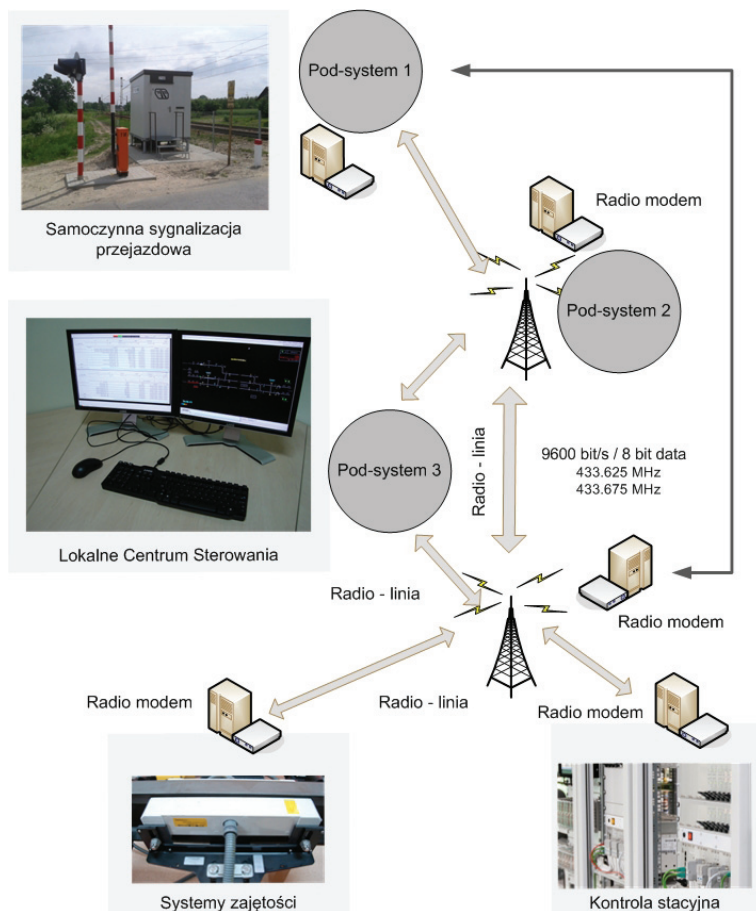
Obecnie, na polskich kolejach jest wykonywany eksperymentalny system przeznaczony dla linii regionalnych (linia Radom–Tomaszów Mazowiecki), w którym transmisja danych jest realizowana przez sieć radiową. W systemie można wyróżnić:

- lokalne centrum sterowania (LCS),
- system zależnościowy dla małej stacji (SZ),
- system nadzoru zajętości toru (ZT),
- samoczynne sygnalizacje przejazdowe (SSP).

Przykładową strukturę linii regionalnej, wyposażonej w transmisję radiową pokazano na rysunku 2. Transmisja radiowa używa standardu w kanale 433.725 MHz z pasmem 25 MHz. Szybkość transmisji danych jest na poziomie 19 200 bit/s. Ze względu na konieczność zachowania bezpieczeństwa transmisji danych, do kodowania użyto klucza 128 bit AES zgodnie z normą EN 50129 oraz kodu CRC32 [7]. Dodatkowo, zastosowane urządzenia transmisyjne Satellar, charakteryzujące się wysoką niezawodnością (MTBF około 52 600 h), stanowią zapórę przed nieupoważnionym dostępem.

3. Modelowanie systemów z transmisją radiową

Główną zmianą w zakresie bezpieczeństwa systemu jest użycie transmisji radiowej stosowanej na różnych poziomach odpowiedzialnych za zarządzanie i kontrolę ruchu kolejowego [2]. Do analizy podstawowych parametrów wpływających na bezpieczeństwo i funkcjonalność możliwe jest, zgodnie z obowiązującymi



Rys. 2. Struktura linii regionalnej wyposażonej w transmisję radiową [oprac. własne]

normami, stosowanie procesów Markowa, które należą do grupy procesów stochastycznych. Ten typ procesów pozwala na modelowanie i wyznaczanie charakterystycznych parametrów systemów zarządzania i sterowania ruchem kolejowym z uwzględnieniem teorii masowej obsługi, kolejek i opóźnień [3, 5].

Z uwagi na wprowadzenie do transmisji toru radiowego, autorzy proponują jako miarę bezpieczeństwa przyjąć dostępność systemu (suma prawdopodobieństw pracy systemu w stanach poprawnych).

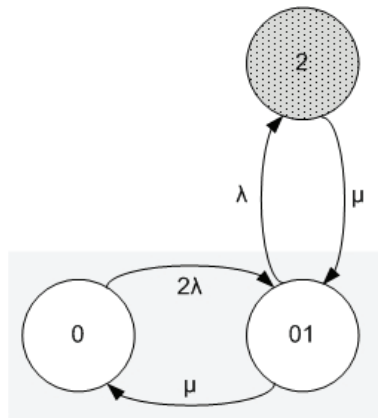
$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_i P_i(t) \quad (1)$$

gdzie i jest związane ze stanami poprawnej pracy.

3.1. Podsystem

W elementarnych urządzeniach podsystemu takich, jak systemy zajętości toru, samoczynne sygnalizacje przejazdowe, liczniki osi, układy zajętości toru, zaproponowano transmisję radiową dwukanałową. Na rysunku 3 przedstawiono model Markowa z transmisją dwukanałową pojedynczego urządzenia [4]. W modelu można wyróżnić:

- 0 – stan operacji z dwoma kanałami transmisji,
- 01 – stan operacji z jednym kanałem transmisji,
- 1 – stan uszkodzenia obu kanałów transmisji.



Rys. 3. Model Markowa z transmisją dwukanałową pojedynczego urządzenia
[oprac. własne]

Transmisja pomiędzy poszczególnymi stanami jest opisana przez:

λ – intensywność uszkodzeń pojedynczego kanału transmisji,

μ – intensywność napraw, powrót ze stanu z uszkodzoną transmisją.

Model pokazany na rysunku 3 można opisać następującymi równaniami:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -2 \cdot P_0 \cdot \lambda + \mu \cdot P_{01} \\ \frac{dP_{01}}{dt} = 2 \cdot \lambda \cdot P_0 - P_{01} \cdot \lambda - \mu \cdot P_{01} + \mu \cdot P_1 \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda \cdot P_{01} - \mu \cdot P_1 \end{cases} \quad (2)$$

W celu rozwiązania układu równań różniczkowych posłużono się programem Mathematica. Prawdopodobieństwa znalezienia się w poszczególnych stanach modelu P_0 , P_{01} oraz P_1 dla $t \rightarrow \infty$, wynoszą:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \frac{\mu^2}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}, \\
 P_{01} &= \frac{2\lambda\mu}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}, \\
 P_1 &= \frac{2\lambda^2}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

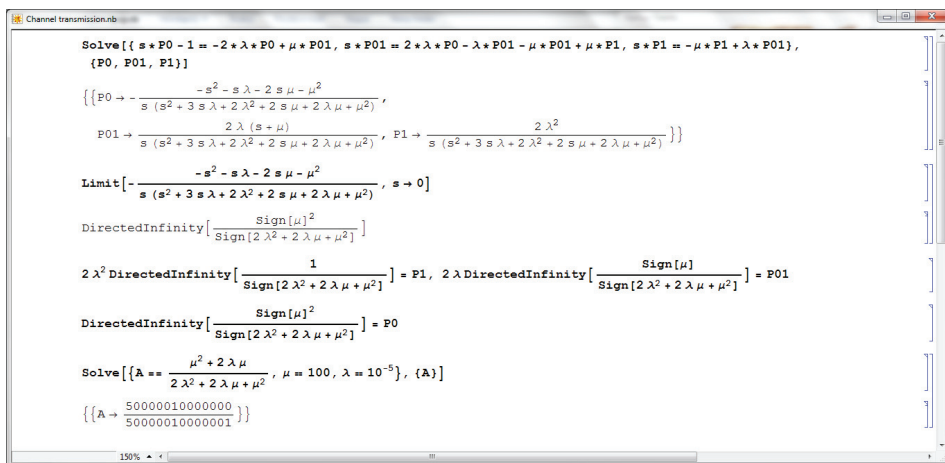
Dostępność, jako sumę prawdopodobieństw stanów P_0 oraz P_{01} wyrażono wzorem:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=0,01} P_i(t) = P_0 + P_{01} = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{2\lambda^2 + 2\lambda\mu + \mu^2} \tag{4}$$

Zakładając wartości λ na poziomie $10^{-5}h^{-1}$ (rekomendowane dla urządzeń z poziomem SIL2) oraz $\mu = 10^2/h$, możliwe jest oszacowanie wartości liczbowej A:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=0,01} P_i(t) = 0,999999999999999 \tag{5}$$

(czas opóźnień τ_{d1} jest wyrażony jako μ^{-1} – typowa wartość wskaźnika jest na poziomie $10h^{-1}$). Na rysunku 4 przedstawiono okno analizy modelu z rysunku 3.



Rys. 4. Okno analizy modelu w programie Mathematica [oprac. własne]

3.2. Koncentrator

Model Markowa koncentratora przedstawiono na rysunku 5. Model jest odwzorowaniem teorii masowej obsługi wprowadzonej przez A. Tannenbaum'a dla

systemów komputerowych i telekomunikacyjnych [8]. W modelu możemy wyróżnić stany:

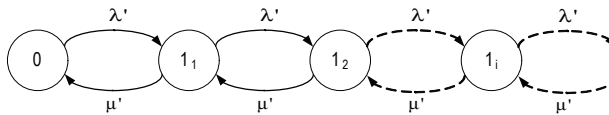
0 – stan obsługi wiadomości,

1_i – stan oczekiwania na obsługę wiadomości, gdzie i jest numerem wiadomości do przetworzenia.

Przejścia pomiędzy stanami opisują:

λ' – intensywność odebranych komunikatów,

μ' – wskaźnik obsługi.



Rys. 5. Koncentrator – model Markowa [oprac. własne]

Dostępność systemu, na podstawie modelu z rysunku 5, wiąże się ze stanem 0:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=0} P_i(t) = P_0 \quad (6)$$

gdzie P_0 wynosi:

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda'}{\mu'} \quad (7)$$

Prawdopodobieństwo P_i można wyrazić jako:

$$P_i = \left(1 - \frac{\lambda'}{\mu'}\right) \left(\frac{\lambda'}{\mu'}\right)^i \quad (8)$$

Czas opóźnienia jest związany z czasem oczekiwania na obsługę (plus czas obsługi):

$$\tau_{d2} = N \frac{1}{\lambda'} \quad (9)$$

gdzie N jest średnią długością wiadomości oczekujących na obsługę:

$$N = \frac{\frac{\lambda'}{\mu'}}{1 - \frac{\lambda'}{\mu'}} \quad (10)$$

Typową wartość λ' oraz μ' można założyć odpowiednio jako $1,2 \cdot 10^2 \text{h}^{-1}$ (odnosi się do średniego czasu oczekiwania na zgłoszenie 30 s) oraz $1,8 \cdot 10^3 \text{h}^{-1}$ (odnosi się do czasu obsługi – 2 s), tak więc możliwe jest oszacowanie $N \approx 0,07$ i $\tau_{d2} \approx 2,1$ s. Dla takich założeń $A = 0,93$ (oszacowana wartość może być wyższa jeśli średni czas pomiędzy zgłoszeniami będzie większy).

3.3. Lokalne Centrum Sterowania

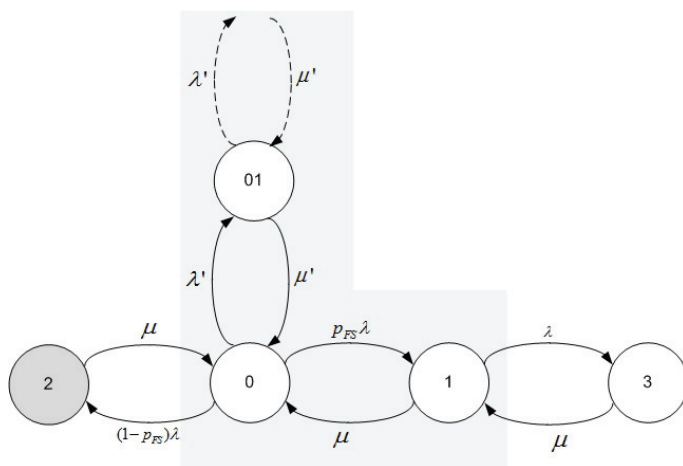
Lokalne Centrum Sterowania jest przykładem systemu pracującego w układzie nadmiarowym typu duplex. W takim przypadku mamy do czynienia z jednym aktywnym pracującym kanałem transmisji, drugi kanał jest traktowany jako gorąca rezerwa, co przedstawiono na rysunku 6. W modelu możemy wyróżnić stany:

- 0 – stan typowej, poprawnej pracy z dwoma kanałami transmisji,
- 01 – stan oczekiwania na obsługę,
- 1 – stan po poprawnym przełączeniu na jeden kanał transmisji,
- 2 – stan niekontrolowanego uszkodzenia (brak łączności z koncentratorem),
- 3 – stan uszkodzenia kontrolowanego (uruchomiona procedura awaryjnego sterowania).

Parametrami przejść pomiędzy poszczególnymi stanami w modelu są:

- λ – intensywność uszkodzeń pojedynczej transmisji,
- μ – intensywność napraw (odwrotność czasu powrotu z uszkodzenia),
- λ'' – intensywność otrzymanych wiadomości,
- μ'' – wskaźnik obsługi (odwrotność czasu obsługi wiadomości),
- p_{FS} – prawdopodobieństwo poprawnego przełączenia na drugi kanał transmisji.

Model zaprezentowany na rysunku 6 jest kompozycją systemu zarządzania i sterowania oraz transmisji danych. Stany 01, 02, 0_i są powiązane z kolejną wiadomości oczekujących na obsługę. Prawdopodobieństwami oczekującymi na obsługę są: P_{01} , P_{02} , P_i , natomiast P_0 jest prawdopodobieństwem wejścia do systemu kontroli.



Rys. 6. Model Markowa dla LCS [oprac. własne]

Dla modelu według rysunku 6 dostępność można zdefiniować jako:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_i P_i(t) = P_{0'} + P_1 = P_{01} \left(1 - \frac{\lambda''}{\mu''} \right) + P_1 \quad (11)$$

gdzie:

$$P_{0'} = P_0 \left(1 - \frac{\lambda''}{\mu''} \right). \quad (12)$$

Na podstawie wzorów (7) oraz (8) można napisać:

$$P_{0'} + P_{01'} + P_{02'} + \dots = P_0. \quad (13)$$

Oszacowane w sposób symboliczny prawdopodobieństwa P_0 i P_1 wynoszą odpowiednio:

$$P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + \mu\lambda + p_{FS}\lambda^2}, \quad (14)$$

$$P_1 = \frac{\lambda\mu p_{FS}}{\mu^2 + \mu\lambda + p_{FS}\lambda^2}.$$

Zakładając wartości współczynników tak jak dla modelu z rysunków 3 i 5, obliczona wartość dostępności jest na poziomie $A = 0,933551592$ ($P_1 = 0,062178681$, $P_0 = 0,933613822$, $P_{0'} = 0,87137291$). Czas opóźnień jest taki sam, ponieważ wartości λ'' i μ'' są założone jak w przypadku analizy koncentratora.

4. Wnioski

Artykuł dotyczy modelowania funkcjonalności i systemów przesyłowych opartych na nowych technologiach – otwartych sieciach radiowych. Zastosowany w artykule aparat matematyczny w postaci procesów Markowa pozwolił na ocenę urządzeń w postaci zaproponowanych modeli. Zaproponowane modele mogą być zweryfikowane za pomocą różnego oprogramowania symulacyjnego oraz rzeczywistych badań laboratoryjnych rzeczywistych urządzeń. Wyniki przeprowadzonej analizy, w tym oszacowane wartości dostępności łącza i opóźnień wynikających z transmisji radiowej między wieloma podsystemami pokazują, iż możliwe jest stosowanie standardów transmisji bezprzewodowej w takich systemach. Oszacowane wartości dostępności dla poszczególnych modeli są na wysokim poziomie.

Dostępność dla podsystemów i LCS mają porównywalne wartości do typowych urządzeń komunikacyjnych pracujących na łączy kablowym. Dostęp przed niepowołanym dostępem jest zagwarantowany dzięki stosowaniu kodowania CRC32 oraz dodatkowego zabezpieczenia kryptograficznego (AES128). Dostępność dla układu koncentratora zależy od czasu obsługi i może być lepszy po zastosowaniu specjalistycznych, przeznaczonych dla systemów kolejowych urządzeń transmisji radiowej. Mała liczba składów pociągów na liniach regionalnych pokazuje, że λ' i λ'' nie są krytyczne dla procesu otrzymywania i obsługi wiadomości. Zależnie od potrzeb, przedstawione model mogą być modyfikowane i analizowane z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów.

Literatura

1. Dziennik Ustaw 2003, nr 86, poz. 789, *Ustawa z dnia 28 marca 2003 roku o transporcie kolejowym*.
2. Lewiński A., Bester L.: *The application of new wireless standards in the management and control of railway traffic*”, Conference TRANSPORT XXI Century, Faculty of Transport, Warsaw University of Technology. Białowieża 2010 (in Polish).
3. Lewiński A., Perzyński T.: *The delay analysis in dissipated railway management and control systems*, Telematic Transport Systems, Conference, 2005.
4. Lewiński A., Perzyński T., Toruń A.: *The Analysis of Open Transmission Standards in Railway Control and Management*, Communications in Computer and Information Science (104), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
5. Perzyński T.: *Problemy bezpieczeństwa sieci komputerowych stosowanych w sterowaniu ruchem kolejowym*. Rozprawa doktorska, Wydział Transportu i Elektrotechniki Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
6. Perzyński T., Łukomski K.: *Proekologiczne rozwiązania w nowych systemach srk*. Technika Transportu Szynowego 9/2012 (CD).
7. PN-EN 50159 – 2010. *Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems*.
8. Tanenbaum A.S.: *Computer Networks*. Prentice Hall PTR, New Jersey 1996.

Railway Control Systems Using New Telematics Technology

Summary

In the paper the new generations of control and management railway systems are presented, with particular emphasis on regional lines. The current rail infrastructure of regional lines enables the use of new telematic technologies, including open radio transmission to the control, management and monitoring of rail vehicle. The efficiency and safety analysis, presented in the paper, was based at stochastic processes. Such approach is consistent with railway standards and EU recommendations.

Keywords: railway control systems, telematics, safety, open transmission, Markov processes

Системы управления железнодорожным движением использующие современные телематические технологии

Резюме

Темой этого труда является новая генерация систем контроля и управления железнодорожным движением, особенно для региональных линий. Настоящая инфраструктура региональных линий дает возможность употреблять телематические технологии, в том числе открытые стандарты радиосвязи для контроля и управления единицами подвижного состава. Представленный в статье анализ эффективности и безопасности основан на случайных процессах и согласен нормам и указаниям Европейского союза.

Ключевые слова: системы управления железнодорожным движением, телематика, безопасность, открытая передача, цепь Маркова