

Możliwość wykorzystania łączności bezprzewodowej w zabezpieczeniu ruchu pociągów na liniach regionalnych

Andrzej LEWIŃSKI¹, Tomasz PERZYŃSKI², Paweł UKLEJA³

Streszczenie

W artykule opisano systemy nowej generacji na potrzeby kontroli i zarządzania ruchem kolejowym, ze szczególnym uwzględnieniem linii regionalnych. Obecna infrastruktura kolejowa takich linii pozwala na implementację nowych technologii telematycznych, w tym otwartych standardów transmisji radiowej do sterowania oraz monitorowania pojazdów szynowych. Przedstawiono analizę matematyczną, opartą na procesach Markowa, co jest zgodne z normami i zaleceniami UE.

Słowa kluczowe: łączność w systemach srk, bezpieczeństwo, modelowanie

1. Wprowadzenie

Sterowanie ruchem na liniach regionalnych, formalnie wydzielonych z Polskich Kolei Państwowych, stanowi odrębny element zarządzania ruchem. Podział ten był podyktowany m.in. wymaganiami bezpieczeństwa, osiąganymi prędkościami taboru lub względami ekonomicznymi. Mimo widocznych zmian w infrastrukturze, jednym z priorytetowych zadań związanych z kolejją jest bezpieczeństwo przewozu osób i towarów. Realizacja tego celu wiąże się z inwestycjami również na liniach regionalnych. Z uwagi na mniejszą częstotliwość kursowania pociągów i mniejsze prędkości w stosunku do linii głównych, istnieje możliwość zaimplementowania transmisji bezprzewodowej do zadań realizowanych przez systemy srk [2]. Systemy sterowania ruchem kolejowym do transmisji danych wykorzystują transmisję zamkniętą i otwartą, zgodną z wymaganiami normy PN-EN 50159-2011 [7, 8]. Zastosowanie rozwiązań opartych na transmisji otwartej (radiowej) w sterowaniu ruchem kolejowym, musi zapewniać ten sam poziom bezpieczeństwa SIL (ang. *Safety Integrity Level*), jak w przypadku tradycyjnej linii transmisyjnej [9]. Przykładową strukturę systemu sterowania ruchem kolejowym na linii regionalnej przedstawiono na rysunku 1.

Podobnie jak dla linii głównych, na potrzeby zarządzania i sterowania ruchem pociągów na liniach regio-

nalnych stosuje się lokalne centra sterowania (LCS). Zależnie od potrzeb zarządcy linii, struktura przedstawiona na rysunku 1 może być włączona do regionalnych centrów sterowania RCS. Lokalne Centrum Sterowania może być uzupełnione o funkcje automatycznego prowadzenia ruchu z jednym komputerem zależnościowym dla wszystkich sterowanych posterunków ruchu.

W artykule przedstawiono przykłady zastosowania transmisji radiowej w systemach sterowania ruchem kolejowym. Rozwiązania te są przeznaczone dla linii regionalnych, jednak bez względu na zastosowaną technologię transmisji danych, systemy srk muszą spełniać wymagania bezpieczeństwa. Do analizy przedstawionych rozwiązań zaproponowano aparat matematyczny w postaci procesów Markowa, które umożliwiają wyznaczanie charakterystycznych wskaźników bezpieczeństwa, co przedstawiono, np. w pracach [1, 6], w tym na analizie modeli systemów wykorzystujących transmisję bezprzewodową [5].

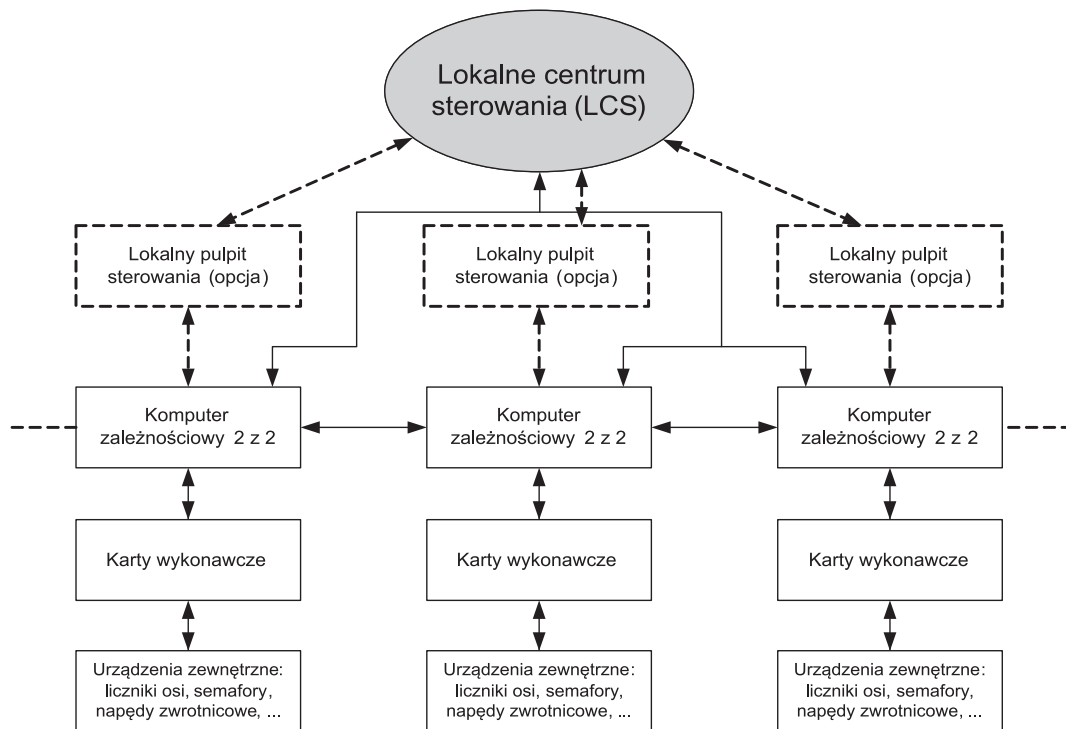
2. Implementacja łączności bezprzewodowej w systemach srk

Przykładem rozwiązań, w których zastosowano bezprzewodową transmisję danych jest system, w którym do transmisji pomiędzy kontenerem sterującym znaj-

¹ Prof. dr hab. inż.; Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. K. Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, e-mail: a.lewinski@uthrad.pl.

² Dr hab. inż.; Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. K. Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki; e-mail: t.perzynski@uthrad.pl.

³ Scheidt & Bachmann Polska Sp. z o.o., Luboń; e-mail: pawel.ukleja@scheidt-bachmann.pl.



Rys. 1. Struktura systemu sterowania ruchem kolejowym na linii regionalnej [10]

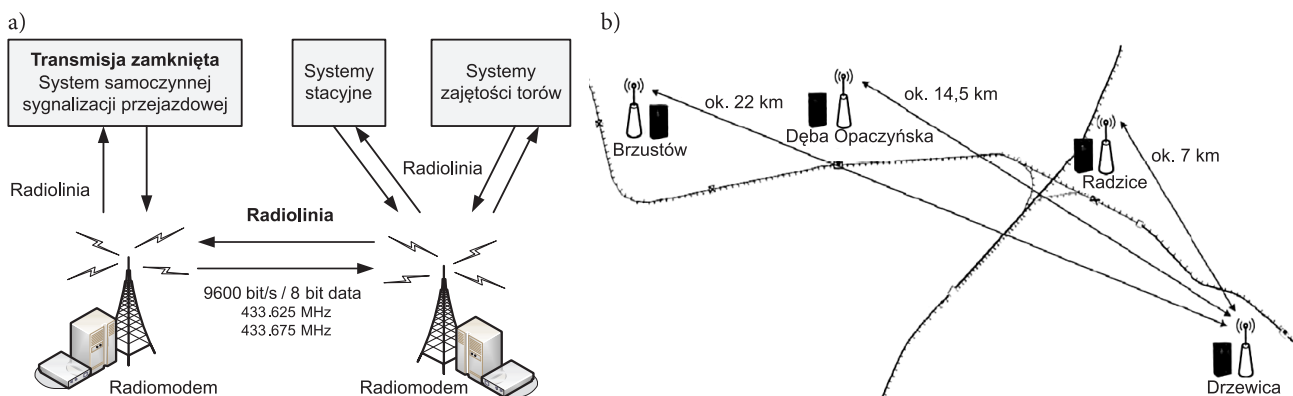
dującym się w obrębie przejazdu kolejowego a punktami oddziaływania w torze wykorzystano radiolinie, co schematycznie pokazano na rysunku 2a [3]. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie ma potrzeby budowy łącza kablowego pomiędzy wspomnianymi elementami. Takie rozwiązanie w dużym stopniu skraca czas zabudowy urządzeń. Dwukanałowa transmisja radiowa jest realizowana przez radiolinie 433.626/433.675 MHz [10].

W przedstawionym przykładzie, do realizacji zadań związanych ze sterowaniem ruchem kolejowym zainstalowano Lokalne Centrum Sterowania (LCS), które kontroluje ruch na trasie Radom Płd. – Tomaszów Mazowiecki oraz współpracuje z systemami kontroli niezajętości torów (SKZR) i systemami

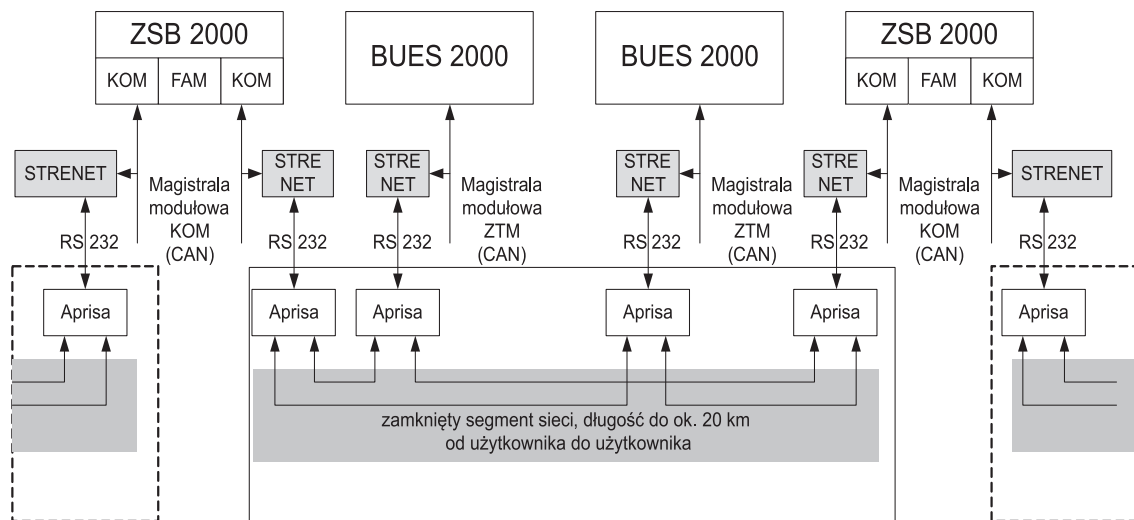
sygnalizacji przejazdowej (SSP), rysunek 2b [10]. W tym rozwiązaniu zastosowano telegramy z typem transmisji *B0*, a szyfrowanie odbywa się zgodnie ze standardem AES i kluczem 128-bitowym [2].

Innym przykładem zastosowania łączności radiowej w systemach srk jest rozwiązanie przedstawione na rysunku 3, na którym przedstawiono schemat sieci pomiędzy urządzeniami systemu ZSB 2000 i BUES 2000.

W przedstawionym schemacie (rys. 3) łączność bezprzewodowa jest realizowana za pomocą sieci i karty STRENET, która obsługuje połączenia typu punkt – punkt. Założono, iż maksymalna odległość pomiędzy punktami nie przekracza 15 km. W celu zwiększenia dostępności systemu istnieje możliwość



Rys. 2. a) struktura systemu SSP z transmisją otwartą [3], b) schemat transmisji LCS Drzewica [10]



Rys. 3. Schemat sieci pomiędzy systemami ZSB 2000 a BUES 2000 [10]

zastosowania topologii typu ring. Takie rozwiązanie umożliwia przesłanie danych w przypadku uszkodzenia transmisji na jednym z odcinków. W skład zaproponowanego rozwiązania wchodzi:

- moduł FAM (element wewnętrzny systemu ZSB 2000),
- moduł komunikacyjny KOM (element wewnętrzny systemu ZSB 2000),
- karta STRENET, która jest częścią składową płaszczyzny wykonawczej i generuje protokół bezpieczeństwa dla transmitowanych danych,
- przemysłowy modem radiowy (Aprisa SR 4RF), dokonujący automatycznego szyfrowania danych przy użyciu algorytmu AES-256 bitów i uwierzytelnia za pomocą CCM.

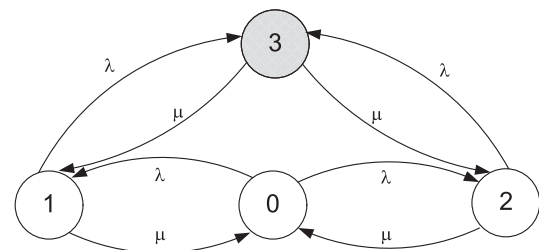
Przedstawione powyżej rozwiązanie jest projektem, który może zostać uruchomiony do celów testowych na wybranej linii kolejowej. Na poligonie doświadczalnym przewiduje się wykorzystanie połączenia kablowego z zachowaniem ringu transmisyjnego z podstawowym kanałem radiowym.

3. Modelowanie systemów srk

Na rysunku 4 przedstawiono model odwzorowujący pracę systemu z transmisją radiową. Do przeprowadzenia analizy matematycznej zaproponowano procesy Markowa. Założono stacjonarny, jednorodny i ergodyczny charakter procesów Markowa. Takie założenie pozwoliło na ograniczenie się do rozkładu wykładniczego ze stałą intensywnością uszkodzeń $\lambda = \text{constans}$ [7]. W modelu można wyróżnić:

- stan 0 – transmisja danych w obu kanałach (stan bezpieczny),
- stan 1 – brak transmisji danych w kanale pierwszym,

- stan 2 – brak transmisji danych w kanale drugim,
- stan 3 – brak transmisji danych w obu kanałach (stan niebezpieczny).



Rys. 4. Model uwzględniający transmisję radiową [opracowanie własne]

W stanie 1 lub 2 mamy do czynienia z brakiem transmisji w jednym z kanałów. Mimo uszkodzenia transmisji w jednym z kanałów, pracujący drugi, zdublowany kanał, umożliwia kontynuowanie pracy systemu w stanie awaryjnym. W zaproponowanym modelu najbardziej niepożądanym stanem jest stan 3. Dla modelu z rysunku 4 można zapisać równania w postaci operatorowej z uwzględnieniem warunku początkowego:

$$\begin{cases} s \cdot \tilde{P}_0 - 1 = -2\lambda \tilde{P}_0 + \mu \tilde{P}_1 + \mu \tilde{P}_2 \\ s \cdot \tilde{P}_1 = \lambda \tilde{P}_0 - \mu \tilde{P}_1 - \lambda \tilde{P}_1 + \mu \tilde{P}_3 \\ s \cdot \tilde{P}_2 = \lambda \tilde{P}_0 - \mu \tilde{P}_2 - \lambda \tilde{P}_2 + \mu \tilde{P}_3 \\ s \cdot \tilde{P}_3 = \lambda \tilde{P}_1 + \lambda \tilde{P}_2 - \mu \tilde{P}_3 - \mu \tilde{P}_3 \end{cases} \quad (1)$$

Rozwiązując układ równań (1) przy wykorzystaniu programu Mathematica (rys. 5) otrzymano graniczne

prawdopodobieństwa znalezienia się w poszczególnych stanach modelu:

$$P_0(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2}, P_1(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\lambda \mu}{(\lambda + \mu)^2},$$

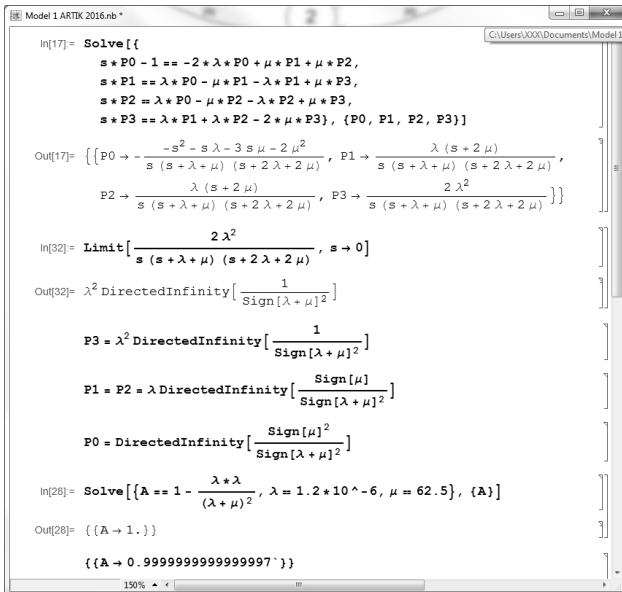
$$P_2(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\lambda \mu}{(\lambda + \mu)^2}, P_3(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2}. \quad (2)$$

Do dalszej analizy, jako parametr niezawodnościowy zaproponowano dostępność A:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_i P_i(t). \quad (3)$$

Zakładając parametry $\lambda = 1.2E-06h^{-1}$ oraz $\mu = 62.5h^{-1}$ (co odpowiada powrotowi w czasie 1 min.) oszacowano graniczną wartości dostępności $A(t)_{t \rightarrow \infty}$:

$$A(t)_{t \rightarrow \infty} = 0,9999. \quad (4)$$



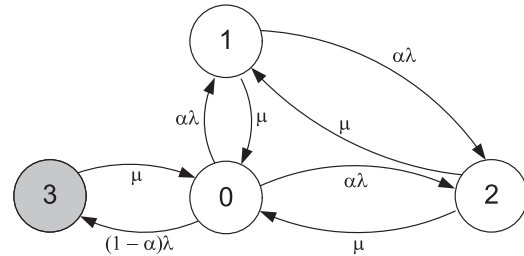
Rys. 5. Mathematica – rozwiązanie modelu z rysunku 4
[opracowanie własne]

Kolejny model jest przykładem transmisji pomiędzy posterunkami ruchu. Układ pracuje w topologii typu ring. W modelu założono dwa posterunki, jeden system na szlaku (np. ssp) oraz hiperwykładniczy rozkład czasu obsługi (system obsługi M/H2/1).

W modelu z rysunku 6 można wyróżnić:

- stan 0 – informacja o stanie blokady liniowej w stacji nr 1,
- stan 1 – informacja o stanie blokady liniowej dociera tylko do pośredniczącego urządzenia na szlaku np. systemu ssp,

- stan 2 – informacja o stanie blokady liniowej ze stacji nr 1 dociera do stacji nr 2,
- stan 3 – utrata informacji.



Rys. 6. Model transmisji danych pomiędzy posterunkami
[opracowanie własne]

Parametry λ , μ i α opisują odpowiednio:

- λ – zapytanie o stan blokady liniowej,
- μ – odpowiedź zwrotna o stanie blokady liniowej,
- α – prawdopodobieństwo z jakim zostanie wysłane zapytanie.

Dla modelu z rysunku 6 można zapisać równania w postaci operatorowej:

$$\begin{cases} s \cdot \tilde{P}_0 - 1 = -\alpha\lambda \tilde{P}_0 + \mu \tilde{P}_1 - \\ \quad + (1-\alpha)\lambda \tilde{P}_0 + \mu \tilde{P}_3 - \alpha\lambda \tilde{P}_0 + \mu \tilde{P}_2 \\ s \cdot \tilde{P}_1 = \alpha\lambda \tilde{P}_0 - \mu \tilde{P}_1 - \alpha\lambda \tilde{P}_1 + \mu \tilde{P}_2 \\ s \cdot \tilde{P}_2 = \alpha\lambda \tilde{P}_1 - \mu \tilde{P}_2 - \mu \tilde{P}_2 + \alpha\lambda \tilde{P}_0 \\ s \cdot \tilde{P}_3 = (1-\alpha)\lambda \tilde{P}_0 - \mu \tilde{P}_3 \end{cases} \quad (5)$$

Rozwiązując układ równań (5) metodą jak dla poprzedniego modelu, obliczono graniczne prawdopodobieństwo P_3 oraz dostępność A:

$$A = 1 - P_3(t)_{t \rightarrow \infty} = 1 - \frac{(1-\alpha)\lambda}{\lambda + \alpha\lambda + \mu}. \quad (6)$$

Zakładając parametry przedstawione w tabelicy 1 oszacowano dostępność $A(t)_{t \rightarrow \infty}$.

Tabela 1

Założenia do obliczeń

λ (intensywność zapytań)	$\mu = 1/t$ (odwrotność czasu odpowiedzi)	α	$A(t)_{t \rightarrow \infty}$
co 5 s	$t = 5$ s	0,999	0,999975
co 5 s	$t = 1$ s	0,999	0,999857
co 5 s	$t = 0,1$ s	0,999	0,999981

4. Wnioski

Przedstawione w artykule rozwiązania oparte na transmisji radiowej mogą stać się alternatywą dla tradycyjnych kablowych rozwiązań transmisji danych w systemach srk, co potwierdzają realizacje i prace nad tą tematyką przez firmy zajmujące się automatyką kolejową [10]. Zaproponowane modele można modyfikować w celu analizy różnych scenariuszy związanych z transmisją radiową i jej wpływem na bezpieczeństwo.

Uzyskane wyniki potwierdzają, iż zastosowanie transmisji bezprzewodowej pozwala na osiągnięcie wymaganego poziomu dostępności [4]. Dane otrzymane z testów oraz eksploatacji umożliwią weryfikację założonych do analizy parametrów.

Literatura

1. Bester L., Toruń A.: (2014) *Modeling of Reliability and Safety at Level Crossing Including in Polish Railway Conditions*, In: Mikulski J. (eds) *Telematics – Support for Transport*. TST 2014, Communications in Computer and Information Science, vol. 471. Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Lewiński A., Łukasik Z., Perzyński T., Ukleja P.: *The Future Generation of Railway Control Systems For Regional Lines Including New Telematic Solutions*, Archives of Transport Systems Telematics, volume 7, issue 3, 2014, s. 13–17.
3. Lewiński A., Perzyński T., Toruń A.: *Możliwość wykorzystania publicznych standardów transmisji bezprzewodowej w zarządzaniu i sterowaniu ruchem kolejowym*, Prace Naukowe Transport, z. 113, s. 297–310. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2016.
4. Lewiński A., Ukleja P.: *Łączność bezprzewodowa pomiędzy systemami srk na liniach regionalnych*, TTS 10/2013, CD.
5. Lin S., Zhong Z., Cai L., Luo Y.: *Finite state Markov modelling for high speed railway wireless communication channel* in Proc. GLOBECOM'12, 2012, pp. 5421–5426.
6. Morant A., Gustafson A., Söderholm P.: (2016) *Safety and Availability Evaluation of Railway Signalling Systems*. In: Kumar U., Ahmadi A., Verma A., Varde P. (eds) *Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 303–316.
7. Perzyński T.: *Wybrane systemy telematiki w bezpieczeństwie i zarządzaniu w transporcie lądowym i śródlądowym*, Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego Radom, Seria Monografie, nr 201, Radom 2016.
8. PN-EN 50128: *Zastosowania kolejowe – Łączność, sygnalizacja i systemy sterowania – Oprogramowanie dla kolejowych systemów sterowania i zabezpieczenia*.
9. Ukleja P., Perzyński T.: *Możliwość zastosowania transmisji radiowej wzdłuż szlaku kolejowego*, TTS 12/2015, CD s. 2996–2999.
10. Ukleja P.: *Bezpieczeństwo łącza bezprzewodowego pomiędzy systemami sterowania ruchem na liniach regionalnych*, Rozprawa doktorska, Radom 2016.

Possibility of Use the Wireless Communication in Protection of Rail Traffic on the Regional Line

Summary

The paper concern new generation systems for the control and management of rail traffic, with particular taking regional lines into consideration. The current railway infrastructure of such lines enables the implementation of new telematics technologies, including open radio transmission standards for the control and monitoring of rail vehicles. The paper presents a mathematical analysis based on Markov processes, which is consistent with EU standards and recommendations.

Keywords: communications in rail systems, safety, modelling

Возможности использования беспроводной связи в обеспечении движения поездов на региональных линиях

Резюме

В статье рассматриваются системы новой генерации для контроля и управления железнодорожным движением, в особенности региональными линиями. Нынешняя железнодорожная инфраструктура этих линий делает возможной введение новых телематических технологий, в том числе открытых стандартов радиопередачи данных для управления единицами подвижного состава и их контроля. В работе представлен математический анализ основан на процессах Маркова, что соответствует нормам и директивам ЕС.

Ключевые слова: связь в системах СЦБ, безопасность, моделирование