

Michał Opala

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA BIEGOWEGO POJAZDÓW KOLEJOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELU STATYSTYCZNEGO

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono metodę analizy bezpieczeństwa biegowego pojazdu kolejowego polegającą na ocenie poziomu ryzyka związanego z wykojeniem. Jednym z efektów analizy jest wyznaczenie mapy zagrożeń w sieci kolejowej pokazującej miejsca o niskim poziomie bezpieczeństwa biegowego i związanego z tym ryzyka poważnego wypadku w wyniku wykojenia. Wnioskowanie o poziomie bezpieczeństwa odbywa się na podstawie przyjętego modelu statystycznego z użyciem wybranych prekursorów wypadków. Dane do analiz pochodzą między innymi z systemu monitoringu on-line elektrycznego zespołu trakcyjnego ED-74.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo czynne, identyfikacja zagrożeń, prekursorzy wypadków

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie bezpieczeństwa czynnego polega na prewencyjnym minimalizowaniu prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku. Dokonanie oceny efektywności tych działań prewencyjnych wymaga w pierwszej kolejności przyjęcia odpowiedniego modelu przyczynowości wypadkowej. W klasycznym modelu wypadku przyjmuje się, że wypadek jest skutkiem kolejno po sobie występujących zdarzeń, z których każde jest skutkiem zdarzenia poprzedniego i przyczyną zdarzenia przyszłego (model domina, Heinrich 1931). Prosty model ciągu przyczynowo skutkowego prowadzącego do wypadku został następnie rozbudowany poprzez wyraźne rozgraniczenie udziału czynnika materialnego i osobowego oraz uwzględnienie czasu trwania poszczególnych zdarzeń w sekwencji (Hepburn 1953, Benner 1975). Zgodnie z tym modelem warunkiem niezbędnym do zaistnienia wypadku jest to, że w tym samym okresie muszą wystąpić obydwa czynniki, tj. ludzki i materialny oraz dodatkowo czynnik aktywujący. Jeśli okres ten jest odpowiednio długi, wtedy istnieje szansa przerwania sekwencji zdarzeń i uniknięcie wypadku. Modele te mogły tworzyć pojedyncze (szeregowo) i rozgałęzione (szeregowo-równoległe) łańcuchy zdarzeń.

Sposoby prewencji wypadków przyjęte na podstawie tych modeli polegają głównie na wyeliminowaniu głównych przyczyn znajdujących się na początku łańcucha zdarzeń. Istotność czasu trwania poszczególnych sekwencji i faz wypadku była podkreślana w także w późniejszych modelach (Larsson 1981, Viner 1991).

Inny popularny model to tzw. model sera szwajcarskiego (Reason 1990), w tym modelu system porównywany jest do wielu plastrów sera złożonych razem. Dziury w plastrach sera reprezentują niedoskonałości w zabezpieczeniach indywidualnych części systemu, różnią się między sobą pod względem proporcji wielkości i rozmieszczenia. System zawodzi, gdy dziury w sąsiednich plastrach ułożą się względem siebie tak, że możliwe będzie przeniknięcie przez wszystkie plastry. Model zakłada, że do wypadku dochodzi w wyniku nałożenia się na siebie niebezpiecznych warunków, zarówno jawnych jak i ukrytych. Warunki jawne to niebezpieczne działania związane bezpośrednio z wypadkiem, np. błędy maszynisty. Warunki ukryte mogą występować na długo przed wypadkiem, np. stosowanie niepoprawnych praktyk komunikacji, redukcja czasu szkolenia maszynistów.

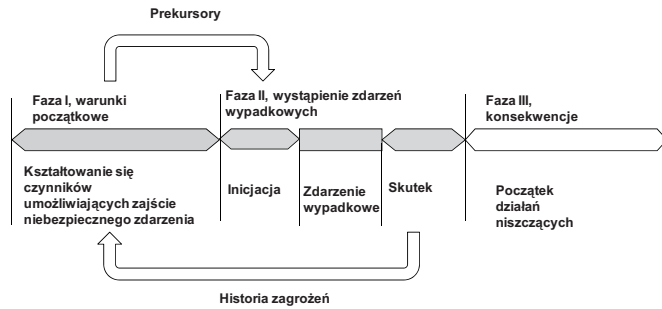
Model transferu energii i zawodności barier (Gibson 1961) zakłada, że aby powstał wypadek, człowiek lub inny obiekt musi zostać poddany działaniu energii przekraczającej pewien poziom dopuszczalny. Wypadek następuje podczas niekontrolowanego przepływu energii od zagrożenia do obiektu przy braku szeroko pojętych barier. Bariery mogą być fizyczne lub proceduralne.

Istnieją także modele, które koncentrują się głównie na przyczynach wypadków związanych z czynnikiem ludzkim. Opisują one przyczyny psychologiczne takie jak osobowościowe nieprzystosowanie do pracy (Selzer 1968), deficyt sprawności wykonawców zadań (Guilford 1973). Inne modele opisują przyczyny takie jak niedostosowanie środowiska pracy i cech zadań do fizycznych, psychologicznych i społecznych możliwości człowieka (Haddon 1970, Martinson 1976). Pierwsza ogólna koncepcja przyczynowości wypadkowej, której elementem centralnym jest czynnik ludzki, przypisywana jest badaczom A. i M. Hale. Według tej koncepcji wypadek jest skutkiem zakłócenia równowagi pomiędzy wymaganiami środowiska pracy, czynnikami technologicznymi, organizacyjnymi a możliwościami człowieka. Według tego modelu profilaktyka wypadkowa polega na zapewnieniu niezawodnego funkcjonowania ludzi w zmieniających się warunkach pracy.

Powyższy krótki przegląd literatury nie wyczerpuje tematu modeli przyczynowości wypadkowej, natomiast opisuje niektóre podstawowe modele a także pokazuje dwie główne koncepcje tworzenia modeli ze względu na miejsce jakie zajmuje w nich element ludzki. Pierwsza koncepcja uwzględnia wpływ człowieka jako jeden z wielu elementów łańcucha przyczynowo skutkowego, obok innych równie ważnych czynników technicznych i organizacyjnych. Natomiast druga koncepcja traktuje działanie człowieka jako element centralny modelu.

W niniejszej pracy wykorzystano sekwencyjny model wypadku, na który składają się dwie fazy. Faza pierwsza to okres w którym kształtują się czynniki umożliwiające zajście niebezpiecznego zdarzenia. Faza druga zawiera w sobie sekwencje zdarzeń składających się na inicjację wypadku, zdarzenie wypadkowe oraz określony skutek. Ocena bezpieczeństwa czynnego odnosi się do fazy pierwszej oraz do części fazy drugiej, jeśli pomiędzy zdarzeniem inicjującym i wypadkowym upływa wystarczająco dużo czasu, aby był możliwy mechanizm ostrzegawczy oraz możliwość podjęcia przeciwdziałania wypadkowi.

W celu analizy i identyfikacji mogących prowadzić do wypadku zdarzeń i czynników fazy pierwszej i drugiej wykorzystano następujące elementy.

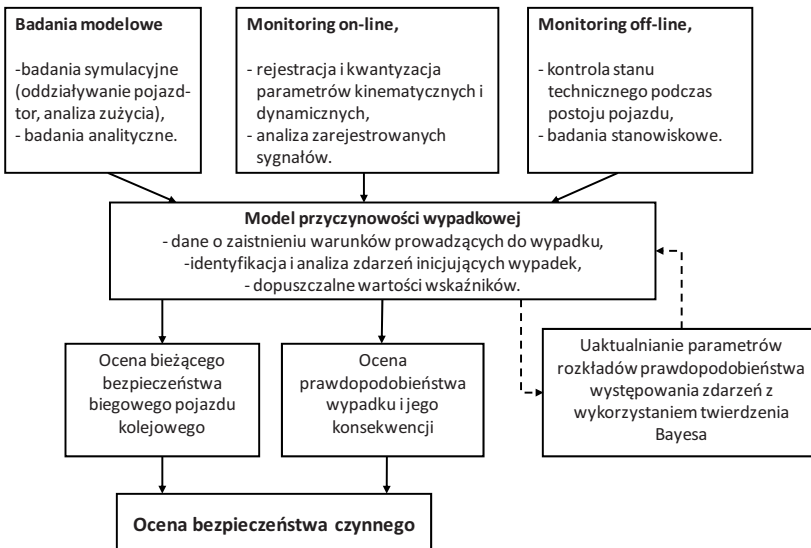


Rys. 1. Model sekwencyjny wypadku

Pierwszy element to analityczne i symulacyjne badania modelowe, mające określić związek pomiędzy dynamiką pojazdu w obecności nierówności geometrycznych toru z uwzględnieniem procesu zużycia profili kół i szyn, a bezpieczeństwem biegowym [1,8].

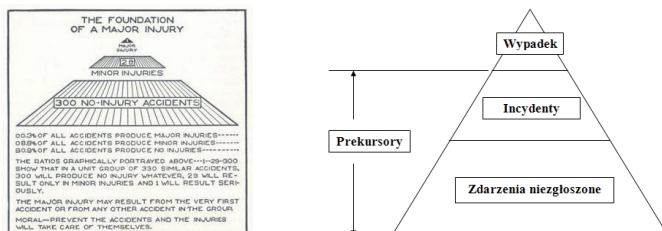
Drugi element to wykorzystanie systemu monitoringu do ciągłego pozyskiwania danych pomiarowych oraz kontrola poziomów parametrów kinematycznych i dynamicznych według kryteriów przyjętych na podstawie wcześniejszych badań modelowych oraz właściwych norm i przepisów w tym zakresie.

Trzeci element to wybór danych wskazujących na zaistnienie zdarzeń i warunków prowadzących do wypadku. Dane takie określane są jako prekursory wypadku.



Rys. 2. Struktura metody oceny bezpieczeństwa czynnego pojazdów kolejowych

W literaturze koncepcja prekursorów opisana była pierwotnie w pracach Heinricha, a następnie w wielu innych pracach np. [9]. Wizualną reprezentacją tej koncepcji jest trójkąt przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Prekursory wypadków. Po lewej stronie oryginalny trójkąt Heinricha (1931r)

Koncepcja ta opiera się na trzech spostrzeżeniach dokonanych pierwotnie w czasie obserwacji procesów produkcyjnych i analizy roszczeń ubezpieczeniowych: 1. małych wypadków jest proporcjonalnie więcej niż dużych, 2. bliższe oględziny wypadku pozwalają stwierdzić, że było wiele warunków i zdarzeń poprzedzających i prowadzących do wypadku, przy czym małe wypadki często poprzedzają duże, 3. przyczyny małych i dużych wypadków mogą być podobne. Ostatnie spostrzeżenie może być kontrowersyjne [2] ze względu na dużą ogólność i niewystarczającą ilość danych potwierdzających jego słuszność. Natomiast przyjmuje się, że w szczególnych przypadkach jest ono prawdziwe.

2. WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA BIEGOWEGO I OCENA POZIOMU ZAGROŻENIA

Poniżej wymieniono niektóre prekursory związane z bezpieczeństwem biegowym pojazdów szynowych:

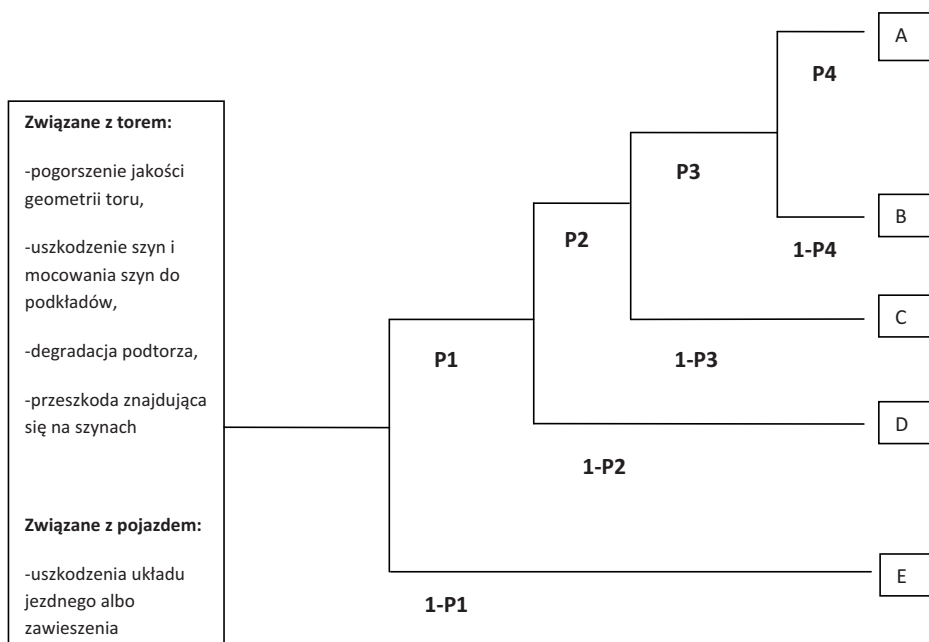
- Uszkodzenia elementów toru i podtorza,
- Uszkodzenie lub niewłaściwe użycie systemu sygnalizacji,
- Uszkodzenie hamulców,
- Uszkodzenie elementów zawieszenia,
- Uszkodzenie układu jezdnego pojazdu, w szczególności: łożysk osi zestawów kołowych oraz kół (płaskie miejsca, pęknięcia, utrata okrągłości).

Przy wyborze odpowiednich prekursorów z reguły niezbędny jest kompromis pomiędzy precyzją prognozowania wypadku w wyniku określonego typu zdarzenia inicjującego a liczbą monitorowanych typów zdarzeń oraz złożonością całego systemu.

W niniejszej pracy za prekursory przyjęto przekroczenia wartości dopuszczalnych wskaźników bezpieczeństwa i zasadnicze zmiany wartości niektórych istotnych parametrów układu pojazd szynowy - tor. W przypadku bezpieczeństwa biegowego najczęściej stosowane wskaźniki bezpieczeństwa oparte są na wielkościach dynamicznych

(Y/Q, H) i wielkościach kinematycznych (przyspieszenia poprzeczne i pionowe odpowiednich punktów pojazdu). W proponowanej metodzie ze względów praktycznych ograniczono się do wykorzystania wskaźników bezpieczeństwa opartych na wielkościach kinematycznych. Oprócz wskaźników normatywnych wykorzystano także inne wskaźniki [4,5,6]. Przekroczenie wartości dopuszczalnych traktowane jest jako zdarzenie inicjujące, które może doprowadzić do wykolejenia. Przyczyny prowadzące do zdarzenia inicjującego wykolejenie i możliwe następstwa przedstawione są za pomocą drzewa zdarzeń na rys. 4.

Przyczyny prowadzące do zdarzenia inicjującego wykolejenie	Zdarzenie inicjujące (przekroczenie wartości dopuszczalnych) Z1	Nieskuteczne działanie systemu bezpieczeństwa Z2	Wykolejenie Z3	Duża prędkość jazdy w chwili wykolejenia Z4	Teren zabudowany Z5	Skutki
--	--	---	-----------------------	--	----------------------------	--------



Skutki:

- A- Katastrofa, ofiary śmiertelne lub obrażenia, duże zniszczenia infrastruktury i taboru,
- B- Katastrofa, możliwe ofiary śmiertelne lub obrażenia, zniszczenia infrastruktury i taboru,
- C- Brak ofiar śmiertelnych, możliwe obrażenia, niewielkie zniszczenia infrastruktury i taboru,
- D- Uniknięcie wypadku,
- E- Zadziałanie systemu bezpieczeństwa i uniknięcie wypadku.

Rys. 4. Przyczyny prowadzące do zdarzenia inicjującego wykolejenie i możliwe następstwa

Elementem oceny ilościowej jest ustalenie wartości prawdopodobieństwa wykolejenia na podstawie przyjętego modelu, wykorzystując informację o występowaniu zdarzeń inicjujących oraz odniesienie wyniku do przyjętych wartości referencyjnych.

Układ jezdny pojazdu wraz z torem, traktowany jest z punktu widzenia teorii niezawodności jako „czarna skrzynka” - element którego zadaniem jest zapewnienie właściwego prowadzenia pojazdu w torze w pewnym z góry nieokreślonym czasie, a uszkodzenie tego elementu oznacza wykolejenie pojazdu.

Prawdopodobieństwo skutku A będącego wynikiem wykolejenia można zapisać następująco:

$$P(A | Z1) = P(Z1 \cap Z2 \cap Z3 \cap Z4 \cap Z5) = P(Z1) \cdot P(Z2) \cdot P(Z3 | Z1 \cap Z2) \cdot P(Z4) \cdot P(Z5)$$

Prawdopodobieństwa pozostałych skutków wyznaczane są analogicznie. Przyjęto że rozkład prawdopodobieństwa wykolejeń jest rozkładem Poissona:

$$P(Y = k | \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!}, k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\} \quad (1)$$

Gdzie: k – liczba wykolejeń, t – czas [h], λ – funkcja intensywności uszkodzeń (wykolejeń).

Estymator intensywności wykolejeń określono w dziedzinie czasu:

$$\lambda = \frac{\text{liczba_wykolejeń}}{\text{liczba_kursujacych_pojazdów} * \text{liczba_godzin_w_roku}} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (2)$$

Wyznaczanie prawdopodobieństwa wykolejenia po zdarzeniu inicjującym oparte jest na modelu losowym, w którym przyjęto następujące założenia: a) każde pojawienie się prekursora wypadku (przekroczenie wartości dopuszczalnych) ma tylko dwa możliwe następstwa: zadziałanie zabezpieczeń (sukces) lub wykolejenie (porażka), b) prawdopodobieństwo sukcesu s lub porażki $p=1-s$ jest stałe w przyjętym okresie, c) każda próba jest niezależna. Prawdopodobieństwo uzyskania dokładnie x sukcesów przy n próbach jest opisywane rozkładem dwumianowym. Korzystając z prawa rzadkich zdarzeń (gdy zdarzenie występuje rzadko ale ma bardzo wiele możliwości aby się zdarzyć) rozkład dwumianowy może być przybliżony rozkładem Poissona. Estymator prawdopodobieństwa wykolejenia po zdarzeniu inicjującym:

$$P_2 = p = \frac{\lambda}{n}, \text{ gdy } \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot p = \lambda, \quad (3)$$

gdzie n – średnia liczba zdarzeń inicjujących w ciągu godziny jazdy.

Przyjęcie założenia o stałym prawdopodobieństwie sukcesu jest znacznym uproszczeniem, gdyż prawdopodobieństwo wykolejenia zmienia się w zależności od warunków, jest ono jednak stosunkowo małe. Ponad to predykcja bezpieczeństwa ma tutaj charakter oszacowania. Estymator prawdopodobieństwa dużej prędkości jazdy w chwili wykolejenia:

$$P_3 = \frac{w}{n}, \quad (4)$$

gdzie w – liczba zdarzeń inicjujących przy dużej prędkości jazdy.

Częstotliwość występowania skutku A:

$$\lambda_A = \lambda \cdot P(A | Z1) \quad (5)$$

Prawdopodobieństwo wykolejenia z uwzględnieniem liczby zdarzeń inicjujących:

$$P_n = 1 - e^{-npt} \quad (6)$$

Gdzie: p – prawdopodobieństwo wykolejenia po zdarzeniu inicjującym równe P_2 . Dla małych wartości P_n możliwe jest zastosowanie wzoru uproszczonego $P_n = npt$.

Wartości pozostałych prawdopodobieństw przyjęto na podstawie danych statystycznych o wypadkach kolejowych.

Jako wartości referencyjne przyjęto wartości zawarte w normach opisujących standardy niezawodnościowe poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa funkcjonalnego SIL wg. normy EN 62061 oraz poziomu wydajności PL wg. normy EN ISO 13849-1. Normy te definiują odpowiednie wartości dopuszczalnego prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu kluczowego z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Korzystając z powyższych wzorów oraz z danych statystycznych za rok 2010, można wyliczyć wartość parametru intensywności wykolejeń, wartość ta wynosi $\lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ [1/h].

Natomiast wyliczone prawdopodobieństwo wykolejenia po jednym zdarzeniu inicjującym w ciągu godziny wynosi: $P_n = 2,1 \cdot 10^{-5}$.

Powyższe wartości wraz z grupą wartości prawdopodobieństw (skutków ABCDE), policzonych wg. schematu przedstawionego na rys.4, są wskaźnikami prognostycznymi bezpieczeństwa czynnego w przyjętym modelu. Pozostałe wskaźniki bezpieczeństwa czynnego opisane zostały w innych pracach [4,5,6].

Wyznaczona wartość parametru intensywności wykolejeń może być dynamicznie aktualizowana dla indywidualnego pojazdu przy pomocy twierdzenia Bayesa.

Traktując parametr intensywności wykolejeń λ jako zmienną losową o pewnym rozkładzie, możemy zastosować powyższe twierdzenie w celu wyznaczenia parametrów tego rozkładu [3]:

$$f(\lambda | Y) = \frac{h(\lambda)l(Y | \lambda)}{\int l(Y | \lambda)h(\lambda)d\lambda} = \frac{h(\lambda)l(Y | \lambda)}{f(Y)} \quad (7)$$

Gdzie: λ - parametr - intensywność wykolejeń, Y - liczba zaobserwowanych wykolejeń.

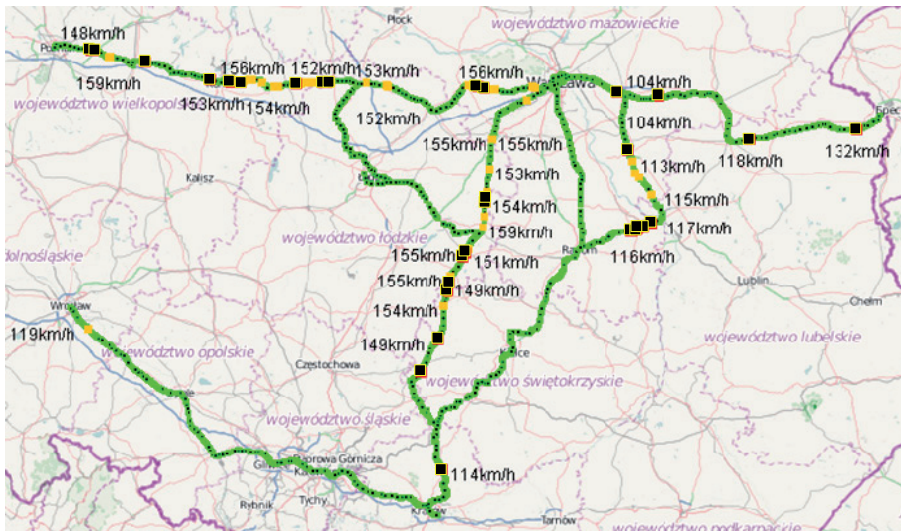
W statystyce bayesowskiej, sprzężony rozkład a priori dla parametru skali λ rozkładu Poissona jest rozkładem gamma. Oznacza to, że λ ma rozkład zgodnie z gęstością g parametryzowaną ze względu na parametr kształtu α i odwrotny parametr skali β .

$$g(\lambda | \alpha, \beta) = \beta^\alpha \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad (8)$$

gdzie, na podstawie okresu wcześniejszego: α_{prior} – liczba zdarzeń, β_{prior} – okres w którym zaszły zdarzenia. Rozkład a posteriori jest również rozkładem gamma $\lambda \approx \text{Gamma}(\alpha_{\text{PRIOR}} + Y, \beta_{\text{PRIOR}} + T)$, gdzie T – okres, Y – liczba kolejnych zdarzeń.

3. WYZNACZANIE MAPY OBSZARÓW O NISKIM POZIOMIE BEZPIECZEŃSTWA CZYNNEGO

Dane zarejestrowane przy pomocy czujników zainstalowanych na pojeździe będącym w normalnej eksploatacji, w tym także dane o położeniu geograficznym pojazdu wykorzystane są do oznaczenia odcinków linii kolejowej na których dochodzi do systematycznego przekraczania wartości dopuszczalnych wskaźników bezpieczeństwa czynnego (miejsca zaznaczone kwadratami na rys. 5). Dla każdego z tych miejsc wyliczane jest następnie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku o skutkach katastroficznych. W przyjętym modelu poziom negatywnych skutków zależy od tego z jaką prędkością porusza się pojazd w miejscu gdzie systematycznie występują zdarzenia inicjujące oraz czy obszar ten jest zabudowany.



Rys. 5. Przykład mapy obszarów o niskim poziomie bezpieczeństwa czynnego zaznaczonych kwadratami

4. PODSUMOWANIE

Celem prowadzenia badań przy użyciu przedstawionej metody jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jaki jest poziom bezpieczeństwa czynnego pojazdu kolejowego będącego w bieżącej eksploatacji na określonej trasie i jak może się zmieniać ten poziom w najbliższej przyszłości? Proponowana metoda różni się od istniejących metod normatywnych (i opartych na nich innych metodach) w następujący sposób:

-ocena może odbywać się w sposób ciągły,

-ocena odbywa się w dowolnych warunkach, które zaistniały w czasie eksploatacji,

-zastosowano dodatkowe kryterium do oceny bezpieczeństwa przed wykołosem,

-wprowadzono element predykcji bezpieczeństwa na podstawie przyjętego statystycznego modelu przyczynowości wypadkowej. W modelu wykorzystano m.in. koncepcję prekursorów rzadkich zdarzeń o wysokim poziomie ryzyka.

Zastosowanie metody wymaga odpowiedniego systemu technicznego pozyskiwania danych. Dane pozyskiwane są w sposób ciągły podczas eksploatacji pojazdu i przesyłane są do serwera systemu. Na serwerze tworzona jest mapa niebezpiecznych miejsc a także wykonywana jest analiza trendów średnio i długoterminowych.

Bibliografia

1. Chudzikiewicz A., Opala M., Application of Computer Simulation Methods for Running Safety Assessment of Railway Vehicles in Example of Freight Cars, Applied Mechanics and Materials Vol. 9, ISSN 1660-9336, pp 61-69, Trans Tech Publications Ltd, 2008.
2. Hale A.: Conditions of occurrence of major and minor accidents. Urban myths, deviations and accident scenarios, Tijdschrift voor toegepaste Arboretenschap 15, nr 3, 2002.
3. Kelly D., Smith C., Bayesian Inference for Probabilistic Risk Assessment, A Practitioner's Guidebook, Springer-Verlag, ISSN 1614-7839, London Limited 2011.
4. Opala M., Analysis of experimental data in the context of safety against derailment of a railway vehicle, using energy method, Key Engineering Materials Vol. 518, pp. 16-23, ISSN 1013-9826, Trans Tech Publications Ltd, 2012.
5. Opala M., Energy analysis of safety against derailment in the railway vehicle's condition monitoring system, IAVSD, Proceedings of 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Manchester, ISBN 978-1-905476-59-6, 2011.
6. Opala M., Monitoring pozycjonowania pojazdu szynowego typu EZT, XX Międzynarodowa Konferencja Naukowa ICRV „Pojazdy Szynowe”, 2012.
7. Opala M., Chudzikiewicz A, Sowiński B., Using lookup tables for a railway rail profile wear calculation, Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, Hungary 2008.
8. Opala M., Algorytmy oprogramowania systemu monitorowania pojazdu kolejowego, Czasopismo Logistyka, lipiec-sierpień, ISSN 1231-5478, 4/2011.
9. Phimister J.R., Bier V.M., Kunreuther H.C., Accident precursor analysis and management, Reducing Technological Risk Through Diligence, The National Academies Press, Washington, D.C., 2004
10. DNV, Assessment of freight train derailment risk reduction measures: B2 – Risk model and potential effectiveness of measures, Report for European Railway Agency, Report No: BA000777/07, Rev: 02, 21 July 2011.

Acknowledgment

The authors express their gratitude for the financial support given by the Polish Ministry of Science and Higher Education for the support of research within the framework of the project Monitoring of Technical State of Construction and Evaluation of its Lifespan – MONIT.

**ANALYSIS OF THE RAILWAY VEHICLE RUNNING SAFETY USING
STATISTICAL MODEL**

Summary: Presented method for analyzing the running safety of the railway vehicle consist in the evaluation of the level of risk associated with the derailment. One of the results of the analysis is determination of the hazard map showing locations in the railway network with a low level of running safety and the associated risk of a serious accident as a result of the derailment. Reasoning about the level of safety is based on a statistical model adopted with selected precursors of the accidents. One of the sources of data used for the analysis is the on-line monitoring system installed on the electric multiple unit ED-74.

Keywords: active safety, hazard identification, precursors of the accidents