

EWA PAŁKA, STANISŁAW MŁYNARSKI\*

## ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA W POJEŹDZIE SZYNOWYM

---

### ANALYSIS OF SAFETY IN RAIL VEHICLE

#### Streszczenie

W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z analizą bezpieczeństwa pojazdów szynowych z wykorzystaniem modeli symulacyjnych. Przedstawiono metody obliczeń i wyniki symulacji awaryjnego zatrzymania pociągu.

*Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, pojazdy szynowe, model symulacyjny, niezawodność*

#### Abstract

The paper presents selected problems of safety analysis of railway vehicles with application of simulating models. There are introduced calculation methods and results of simulations carried on rail vehicle emergency braking.

*Keywords: safety, railway vehicles, simulating model, reliability*

---

\* Mgr inż. Ewa Pałka, dr inż. Stanisław Młynarski, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Problematyka niezawodności i bezpieczeństwa systemów pojazdów szynowych w ciągu ostatnich lat podjęta została w Polsce w badaniach naukowych i stale jest rozwijana. Natomiast poczynania zmierzające do podniesienia poziomu niezawodności i bezpieczeństwa uwzględniane są już na etapie ich projektowania.

Obecnie niezbędne staje się wykorzystywanie współczesnych osiągnięć teorii niezawodności i teorii bezpieczeństwa oraz coraz częściej znajduje zastosowanie pojęcie ryzyka w przypadku rozważań i analiz techniczno-ekonomicznych przedsięwzięć z zakresu systemów, co odpowiada światowym trendom.

W chwili obecnej można zauważyć, że najbardziej rozwijana jest teoria niezawodności, przy czym określa się w tychże systemach niezawodność funkcjonowania oraz niezawodność bezpieczeństwa mającą związek ze skutkami nie funkcjonowania.

Teoria niezawodności powstała w latach pięćdziesiątych XX wieku, natomiast teoria bezpieczeństwa w latach dziewięćdziesiątych na zasadzie tzw. ruchu obronnego, gdyż mała niezawodność i występujące w związku z tym awarie mogą prowadzić nie tylko do przerwania funkcjonowania systemu technicznego, lecz do utraty zdrowia, życia lub szkód monsturalnych.

## 2. Niezawodność w aspekcie bezpieczeństwa

Postępy w stosowaniu teorii niezawodności i teorii bezpieczeństwa są znaczące. W Polsce opublikowano kilkaset prac z tego zakresu. Pierwsza z wyżej wspomnianych dyscyplin naukowych bada wszystkie uszkodzenia elementów i podsystemów, natomiast druga zajmuje się badaniem tych awarii, które stwarzają zagrożenie bezpieczeństwa i wymagają wysiłku różnych wyspecjalizowanych ekip w celu uniknięcia wypadku.

W nawiązaniu do dokonanego przeglądu literatury naukowej i technicznej [3] zdefiniowano niezawodność systemów w sposób następujący:

„Niezawodność określana jest jako prawdopodobieństwo zdarzenia, które polega na tym, że wyrób użytkowany w określonych warunkach będzie zachowywał zdolność do spełnienia stawianych mu wymagań w określonym przedziale czasu użytkowania [3]. Niezawodność, czasem jest też interpretowana jako jakość rozciągnięta w czasie, czyli „niezawodna jakość”. Jakość jest jednak pojęciem nadrzędnym, gdyż wysoka niezawodność nie gwarantuje wysokiego poziomu jakości.

Natomiast definicja niezawodności bezpieczeństwa brzmi następująco:

„Niezawodność bezpieczeństwa jest to właściwość polegająca na niezaiistnieniu uszkodzeń stwarzających zagrożenia bezpieczeństwa lub powodujących wypadków, w wyniku których może nastąpić pogorszenie zdrowia, kalectwo. a nawet utrata życia”.

W nawiązaniu do podanych wyżej definicji należy podkreślić, iż obecnie bada się systemy pojazdów z uwzględnieniem niezawodności funkcjonowania i niezawodności bezpieczeństwa.

Programy dotyczące bezpieczeństwa koncentrują się na sposobach unikania wypadków, na zapobieganiu obrażeniom osób znajdujących się wewnątrz i na zewnątrz pojazdu, a także na niezawodności produktu i zapewnieniu bezpieczeństwa ludzi i towarów.

Doświadczenia płynące z ogólnych badań nad bezpieczeństwem w ruchu, w tym ze statystyk towarzystw ubezpieczeniowych, pokazują, że rzadko wypadki mają tylko jedną przy-

czynę. Z reguły wypadek jest skutkiem połączenia takich czynników jak błąd człowieka, problemy związane z pojazdem lub z sytuacją na torze, jak również warunki pogodowe [4].

Najlepszym sposobem unikania wypadków i innych zdarzeń związanych z ruchem jest prowadzenie pojazdu w możliwie najbezpieczniejszy sposób. Równie ważne aspekty bezpieczeństwa to bezpieczne wsiadanie i wysiadanie z pojazdu.

Niezawodność jest różnie interpretowana, a także postrzegana przez różne osoby w zależności od pełnionej funkcji. Na przykład dla osób, które zajmują się projektowaniem, niezawodność dotyczy gotowości wyrobu do wykonania określonych funkcji tego wyrobu w czasie, kiedy potrzebuje tego użytkownik.

Teoria bezpieczeństwa pozwala nam na dokonanie syntezy i analizy systemu z punktu widzenia bezpieczeństwa. Natomiast teoria niezawodności pozwala nam na dokonanie ilościowej oceny charakterystyk strumienia przyczyn występowania sytuacji niebezpiecznych, uwarunkowanych niezdatnościami, jak również opracowaniem zaleceń mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa, opierając się na polepszeniu niezawodności różnych podzespołów systemu w procesie ich projektowania, wytwarzania i eksploatacji. Najczęściej wykorzystujemy metody probabilistyczne, jako podstawy teorii niezawodności do modelowania bezpieczeństwa systemu.

Rozpatrując teorię niezawodności i teorię bezpieczeństwa, można zauważyć ich pokrewieństwo z tym, że teoria niezawodności kładzie nacisk na zagadnienia uszkodzeń urządzeń technicznych oraz błędy operatorów, natomiast teoria bezpieczeństwa na skutki uszkodzeń i błędów.

Analizując skutki w teorii bezpieczeństwa, sięgamy do tych uszkodzeń i błędów, które stwarzają zagrożenie bezpieczeństwa, oraz do tych, które mogą być spowodowane następującymi przyczynami:

- warunki zewnętrzne, jak np. mgła, burzliwa atmosfera, jakoś, powierzchni jezdnej, błędy w systemie kierowania i ubezpieczenia systemów,
- błędy operatora popełniane w procesie eksploatacji systemu,
- niewłaściwe działanie elementów, agregatów lub zespołów funkcjonalnych wskutek uszkodzenia.

Ocena bezpieczeństwa jest możliwa tylko wtedy, kiedy będą opracowane metody i kryteria ilościowej oceny na poszczególnych etapach: projektowania, produkcji, badań i eksploatacji.

### 3. Wskaźniki bezpieczeństwa

Do podstawowych wskaźników bezpieczeństwa należą:

1. Zawodność bezpieczeństwa  $Q_B(t)$ .
2. Niezawodność bezpieczeństwa  $R_B(t)$ .
3. Intensywność uszkodzeń  $\lambda_B(t)$  rozumiana jest jako gęstość rozkładu prawdopodobieństwa powstania zawodności bezpieczeństwa w chwili  $t + \Delta t$ , przy założeniu, że system nie przeszedł w chwili  $t$  do stanu zdadności bezpieczeństwa. Możemy to zapisać równaniem:

$$P(t < T_B \leq t + \Delta t | T_B \geq t) = \frac{P(t < T_B \leq t + \Delta t)}{P(T_B > t)} = \frac{f_B(t)\Delta t}{R_B(t)} = \lambda_B(t)\Delta t \quad (1)$$

stąd:

$$\lambda_B(t) = \frac{f_B(t)}{R_B(t)} = -\frac{R'_B(t)}{R_B(t)} = \frac{Q'_B}{1-Q_B(t)} \quad (2)$$

gdzie  $f_B(t)$  jest funkcją rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $T_B$ .

Ze wzoru (2) wynika związek Wienera w postaci:

$$R_B(t) = \exp\left[\int_D^t \lambda_B(\tau) d\tau\right] \quad (3)$$

1. Funkcja wiodąca rozkładu bezpieczeństwa zdefiniowana wzorem:

$$\Lambda_B(t) = \int_D^t \lambda_B(\tau) d\tau \quad (4)$$

2. Wartość oczekiwana czasu eksploatacji systemu do chwili jego przejścia do stanu zawodności bezpieczeństwa wyrażona wzorem:

$$E[T_B] = T_B = \int_D^\infty R_B(t) dt \quad (5)$$

3. Liczbowym wskaźnikiem zawodności bezpieczeństwa może być również kwanty  $t_p$  rzędu  $p \in (0, 1)$  zmiennej losowej  $T_B$  spełniająca równanie:

$$Q_B(t_p) = p \quad (6)$$

gdzie  $t_p$  jest czasem, po którym  $p \cdot 100\%$  systemów przejdzie do stanu zawodności bezpieczeństwa.

#### 4. Modele symulacyjne w analizie bezpieczeństwie

Modele symulacyjne znajdują duże zastosowanie w różnych dziedzinach nauki. Można też je wykorzystać w badaniach i projektowaniu bezpieczeństwa pojazdów szynowych. W technice symulacji tworzy się często złożone modele całego systemu i procesów w nim zachodzących, którymi możemy manipulować w taki sposób, aby w rezultacie dokonać oceny funkcjonowania badanego systemu, podlegającego wpływom zmiennych warunków zewnętrznych. Procedury wykorzystywane są przy symulacji eksploatacji, kontroli i korygowania parametrów jakościowych i niezawodnościowych podzespołów pojazdów szynowych, od etapu projektowania (symulacja w CAD), poprzez produkcję (symulacja w CAM i CAP) aż do kontroli, jakości (CAQ) i serwisu (CAS), przy zabezpieczeniu niezawodności eksploatacyjnej.

Modele symulacyjne w kolejnictwie, związane z analizą bezpieczeństwa mają obszerne zastosowanie, gdyż umożliwiają między innymi:

- sprawne, bezkolizyjne zarządzanie logistyczne, dzięki śledzeniu zachowań wirtualnych modeli złożonych systemów i procesów;

- racjonalną analizę doboru materiału na elementy konstrukcji pojazdów szynowych;
- prognozowanie i analizowanie następstw wystąpienia usterek prowadzących do powstania zagrożenia;
- kontrolę czy dany pojazd szynowy jest bezpieczny dla otoczenia.

W infrastrukturze systemu związanego z pojazdem szynowym w pierwszym kroku modelowania stanu bezpieczeństwa należy znaleźć odpowiedzi na pytania:

- czy istnieją (lub mogą być zbudowane) adekwatne modele umożliwiające podejmowanie optymalnych (lub bliskich optymalnym) decyzji?
- czy można zbudować adekwatne modele nie wymagające bezpośredniego wyprowadzania optymalnych rozwiązań?

Po podjęciu decyzji następnym krokiem jest wybór odpowiednich modeli fizycznych podsystemu. Po nim tworzy się modele matematyczne i na ich podstawie konstruuje modele symulacyjne. Realizując te kroki, należy pamiętać o założeniach wynikających z wymagań formalnych (normy, przepisy, zalecenia), ograniczeniach (np. dotyczących dostępności pakietów symulacyjnych) i przesłankach techniczno-organizacyjno-ekonomicznych.

W analizie bezpieczeństwa pojazdów szynowych badany obiekt może być rozpatrywany jako złożony z elementów trój- albo czterostanowych o strukturze: szeregowej, równoległej i mieszanej. Na podstawie literatury [3], w której przedstawione są modele elementów z uwzględnieniem stanu zagrożenia bezpieczeństwa, wybrano do dalszej analizy model systemu z nadmiarowością strukturalną.

## 5. Metoda i narzędzia

Przy ocenie i prognozowaniu stanów bezpieczeństwa obiektów technicznych stosuje się głównie metody matematyczne opierające się na miarach statystycznych, odniesionych do procesów stochastycznych [2–4]. W opisach struktur hierarchicznych często wykorzystuje się pojęcia i metody teorii informacji, np. przy konstruowaniu kryteriów klasyfikacji stanów oraz metody informatyki (np. w zakresie automatyzacji pozyskiwania danych z relacyjnych baz danych).

Przedstawia ona problem badania bezpieczeństwa ruchu pojazdu szynowego, przy zastosowaniu opisu systemu układem równań Kołmogorowa–Chapmana. Sprawdzenie bezpieczeństwa polega na symulacji eksploatacji pojazdu przy zakładanej znajomości intensywności uszkodzeń i popełnianych błędów przez maszynistę oraz po określeniu wartości początkowych poszczególnych prawdopodobieństw i czasów badań symulacyjnych. Wyniki zastosowania tej metody wskazują na dużą zgodność wartości prognozowanych z rzeczywistymi otrzymanymi z pomiarów. Wykorzystuje się ją w procesach kontroli stanu technicznego środków transportu – również szynowego – jako jeden z elementów systemu monitorowania [2].

Obecnie duże, specjalne pakiety symulacji wykorzystuje się przy analizie wypadków, jak również przy predykcji procesów eksploatacji pojazdów szynowych (diagnostyka, niezawodność, bezpieczeństwo) oraz przy analizie pracy całej infrastruktury kolejowej [5].

W niniejszej pracy stosuje się oryginalne programy-moduły symulacyjne, zbudowane na bazie pakietu VisSim & Analyze, służące do komputerowego wspomaganie realizacji zadań związanych z szacowaniem wskaźników bezpieczeństwa wybranych modeli podsystemów pojazdów szynowych.

## 6. Model systemu z nadmiarem strukturalnym; system operator–obiekt techniczny

Pociąg zbliża się do semafora, na którym jest wyświetlony intencjonalnie sygnał „stój” (czerwone światło). System samoczynnego hamowania pociągu (SHP) jest w układzie gorącej rezerwy z maszynistą. Rozpatruje się następujące scenariusze:

1. „Uszkodzenie” maszynisty (np. zasłabnięcie) – pociąg zostanie zahamowany· automatycznie przez urządzenie SHP.
2. Uszkodzenie (awaria) systemu SHP, wówczas pociąg zatrzyma maszynista.
3. Dochodzi do katastrofy, gdy zawiodą dwa „elementy” systemu bezpieczeństwa.

W dwóch pierwszych przypadkach system transportowy znajduje się w stanie zagrożenia bezpieczeństwa, z którego może przejść do stanu zawodności bezpieczeństwa. Uszkodzeniu może bowiem również ulec pozostały element rezerwy (scenariusz 3) albo system może przejść tylko do stanu zawodności sprawności w przypadku uszkodzenia się w tym czasie jakiegoś elementu powodującego jedynie zawodność sprawności, np. pęknięcie przewodu powietrznego hamulca i zatrzymanie pociągu. Należy obliczyć średni czas przejścia systemu do stanu zagrożenia bezpieczeństwa i zawodności sprawności [3, 8].

Podany przykład można zilustrować grafem (rys. 1) i opisać układem równań różniczkowych Kołmogorowa–Chapmana (7).

$$\left. \begin{aligned} R'(t) &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13})R(t), \\ Q'_{ZB}(t) &= \lambda_{13}R(t) - (\lambda_{32} + \lambda_{34})Q_{ZB}(t), \\ Q'_{SR}(t) &= \lambda_{12}R(t) + \lambda_{32}Q_{ZB}(t), \\ Q'_B(t) &= \lambda_{34}Q_{ZB}(t), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

z warunkiem dodatkowym:

$$R(t) + Q_{ZB}(t) + Q_S(t) + Q_B(t) = 1, \quad (8)$$

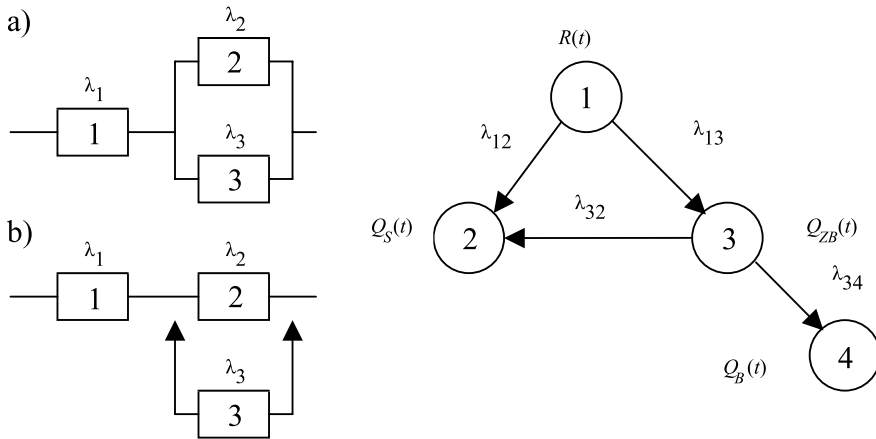
przy warunkach początkowych:

$$Q_{ZB}(0) = Q_S(0) = Q_B(0) = 0, \quad R(0) = 1. \quad (9)$$

gdzie:

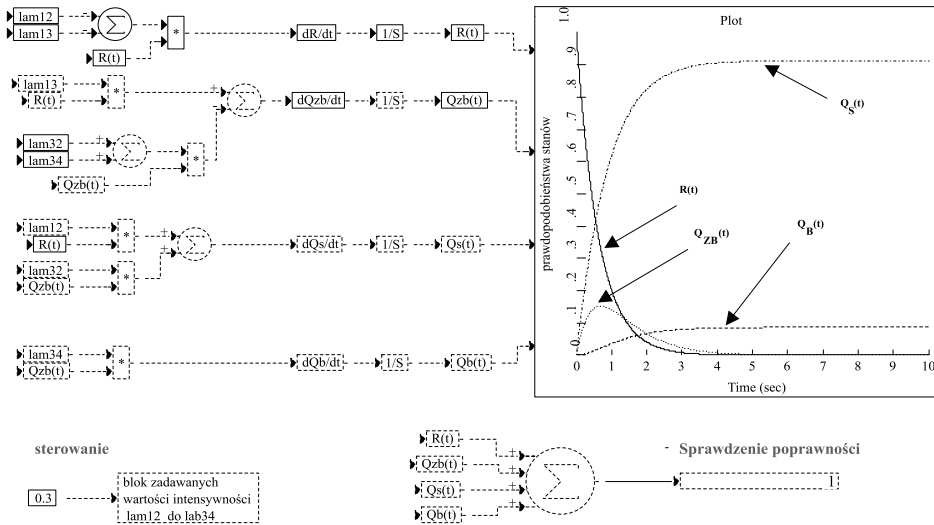
- $R(t)$  – pełna zdadność; (') prim oznacza pochodną po czasie np.  $R'(t) = dR(t)/dt$ ,
- $Q_{ZB}(t)$  – zagrożenie bezpieczeństwa,
- $Q_S(t)$  – zawodność sprawności,
- $Q_B(t)$  – zawodność bezpieczeństwa,
- $\lambda_{12}$  do  $\lambda_{34}$  – intensywności przejść między poszczególnymi stanami.

Wykorzystując pakiet symulacyjny VisSim, przeprowadzono obliczenia prawdopodobieństw poszczególnych stanów systemu. Stosowny diagram ilustrujący wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Schemat i graf modelu systemu z nadmiarem strukturalnym: a) rezerwa gorąca, b) rezerwa chłodna [3]

Fig. 1. Scheme and graph of a model of the system with structural redundancy: a) hot reserve, b) cool reserve [3]



Rys. 2. Schemat symulacji prawdopodobieństwa stanów

Fig. 2. Patern of simulation of probability states

Wyznaczenie wskaźnika sprawności: 
$$Q_S = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} + \frac{\lambda_{32}\lambda_{13}}{(\lambda_{12} + \lambda_{13})(\lambda_{32} + \lambda_{43})}, \tag{10}$$

oraz wskaźnika zawadności bezpieczeństwa: 
$$Q_B = \frac{\lambda_{13}\lambda_{34}}{(\lambda_{12} + \lambda_{13})(\lambda_{32} + \lambda_{34})}. \tag{11}$$

Po obliczeniu wskaźników należy obliczyć średni czas pracy wyrażony wzorem:

$$\bar{T} = \frac{1}{(\lambda_{12} + \lambda_{13})^2} \left[ \lambda_{12} + 2 \frac{\lambda_{13} + \lambda_{34}(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{32} + \lambda_{34})}{(\lambda_{32} + \lambda_{34})^2} \right] \quad (12)$$

Mając wskaźniki i czas, należy obliczyć średni czas przebywania systemu w podzbiorze niezawodnościowych stanów eksploatacyjnych do chwili przejścia:

$$1. \text{ Do stanu zawodności bezpieczeństwa } \bar{T}_B = \frac{\bar{T}}{Q_B} \quad (13)$$

$$2. \text{ Do stanu zawodności: } \bar{T}_S = \frac{\bar{T}}{Q_S}. \quad (14)$$

W poniższej tabeli (1) zostały przedstawione symulacje średnich czasów  $T_{sr}$ ,  $T_{ssr}$ ,  $T_{bsr}$  w zależności od zmiany parametru sterowania  $\lambda_2$ .

Tabela 1

Wyniki symulacji średnich czasów  $T_{sr}$ ,  $T_{ssr}$ ,  $T_{bsr}$

$\lambda_2$	$T_{sr}$	$T_{ssr}$	$T_{bsr}$
0,1	1,188	1,206	78,409
0,4	0,963	1,103	7,589
0,7	0,686	0,903	2,858
0,9	0,553	0,796	1,819

Analizując wzory (13) i (14) oraz wyniki z tabeli (1), można zauważyć, że zawodność bezpieczeństwa maleje ze zmniejszeniem prawdopodobieństwa przejścia systemu ze stanu zdatności do stanu zagrożenia bezpieczeństwa, a następnie do stanu zawodności bezpieczeństwa. Zmniejszenie tych wielkości również powoduje zmniejszenie zawodności sprawności.

## 7. Wnioski

Analizując uzyskane wyniki badań symulacyjnych, można stwierdzić, że:

- Program symulacyjny zbudowany dla modelu systemu o wybranej strukturze umożliwia w elastyczny sposób badanie wpływu zmian parametrów sterowania, pozwala określać średni czas przejścia od stanu eksploatacyjnego do stanu zawodności sprawności i zawodności bezpieczeństwa.
- Pakiet symulacyjny VisSim jest przydatny do rozwiązania postawionych problemów bezpieczeństwa złożonych systemów w kolejnictwie. Zauważono komplementarność ich cech w rozwiązywaniu zadań mieszanych, gdy dane wejściowe podane są w postaci macierzy wartości sygnału albo jawnej zależności funkcyjnej pomiędzy zmiennymi.



## Literatura

- [1] Bobrowski D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989.
- [2] Grabski F., Jaźwiński J., *Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki*, Wydanie 1, Warszawa 2009.
- [3] Jaźwiński J., *Bezpieczeństwo systemów*, PAN, Warszawa 1993.
- [4] Materiały internetowe: Instytut Silników Spalinowych i Transportu na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej, ([www.fwmt.put.poznan.pl/instytut,issit-issit\\_3,996,transport\\_szynowy.html](http://www.fwmt.put.poznan.pl/instytut,issit-issit_3,996,transport_szynowy.html)), Wrota Podlasia ([www.rpowp.wrota-podlasia.pl/aktualnosci/484,kolejny-szynobus-na-podlaskich-torach.html](http://www.rpowp.wrota-podlasia.pl/aktualnosci/484,kolejny-szynobus-na-podlaskich-torach.html)).
- [5] Oprędkiewicz J., Stolarski B., *Komputerowe monitorowanie niezawodności samochodów*, PWN, Warszawa–Kraków 2000.
- [6] Piec P., Magiera J., *Ocena zużycia i niezawodności pojazdów szynowych*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1994.
- [7] Sobański M., Mikulski J., *Bezpieczeństwo systemów sterowania ruchem kolejowym w świetle wymagań norm CENELE*, Czasopismo Przegląd Kolejowy 11/99.
- [8] Ważyńska-Fiók K., Jaźwiński J., *Niezawodność systemów technicznych*, PAN, Warszawa 1990.