

BADANIA PRZEBIEGU I PRZYCZYN WYPADKÓW KOLEJOWYCH METODĄ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Model matematyczny i symulacyjny ruchu pociągu
3. Badania symulacyjne przebiegu jazdy i przyczyn braku hamowności pociągu towarowego
4. Symulacja przebiegu hamowania pociągu towarowego linii LHS
5. Wnioski i uwagi końcowe

STRESZCZENIE

Przedstawiono zagadnienie efektywności symulacji komputerowej w analizie przebiegu oraz przyczyn wypadków i katastrof kolejowych, opierając się na wybranych dwóch przykładach z doświadczeń autora. Opisano podstawowe cechy programów symulacyjnych zastosowanych do analizy zaistniałych sytuacji oraz zarys metody postępowania i wnioskowania. Podano najważniejsze wyniki badań symulacyjnych oraz wnioski z nich wypływające, wraz z odniesieniem ich do rzeczywistego przebiegu wypadków. Stwierdzono skuteczność tej metody; dodatkowo postawiono postulat dotyczący standaryzacji i certyfikacji dokumentacji powypadkowych.

1. WPROWADZENIE

Symulacja komputerowa, oprócz innych wielorakich zastosowań, może służyć do analizy oraz oceny hipotetycznych stanów systemów technicznych i zjawisk mogących zaistnieć nie tylko w przyszłości (względem przyjętej skali czasu), lecz także w przeszłości, przy poszukiwaniu prawdopodobnych (lub domniemyanych) przyczyn rodzących skutki zaistniałe w rzeczywistości. Dotyczy to wielu dziedzin naukowych oraz bardzo wielu zastosowań technicznych – w tym kolejnictwa. Wieloletnie doświadczenia autora niniejszego artykułu wykazały, iż symulacja komputerowa może być efektywnym (i najczęściej jedynym) narzędziem służącym do ustalania i analizy przyczyn niektórych rodzajów katastrof i wypadków kolejowych.

Pierwszym doświadczeniem autora w tym zakresie było ustalenie przyczyn niewystarczającej hamowności (a praktycznie jej braku) długiego i ciężkiego pociągu towarowego, który jadąc po spadku toru, został celowo skierowany na żeberko ochronne stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa, gdzie wskutek uderzenia w kozioł oporowy z prędkością około 54 km/h doszło do katastrofy. Nastąpiło wykolejenie pociągu i zniszczenie lub uszkodzenie

lokomotywy spalinowej TEM2 oraz 21 czteroosiowych załadowanych wagonów (1 wagon kryty i 20 wagonów węglarek). Przypadek ten opisano w pracach [1, 8].

Ostatnim z wypadków kolejowych badanych przez autora za pomocą symulacji komputerowej był wypadek, ze skutkiem śmiertelnym, zaistniały na szerokotorowej linii LHS (*Linia Hutnicza Szerokotorowa*) w okolicach miejscowości Strzegomek. Pociąg towarowy, wiozący rudę żelaza, potrafił nietrzeźwego mężczyznę znajdującego się pomiędzy tokami szyn toru szerokotorowego.

W pierwszym przypadku postawione zadanie polegało na ustaleniu przyczyny (przyczyn) braku hamowności pociągu, pomimo że zapisy w dokumentacji przewidzianej przepisami i sporządzonej przed zaistniałym zdarzeniem wskazywały, że działanie hamulców było prawidłowe.

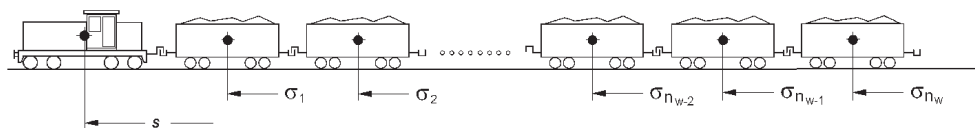
W drugim z przytoczonych wypadków zadanie polegało na ocenie poprawności działania maszynisty lokomotywy oraz na analizie procesu hamowania pociągu. Uznano, że podstawą realizacji postawionych zadań – w obu przytoczonych zdarzeniach – będą symulacyjne badania komputerowe.

2. MODEL MATEMATYCZNY I SYMULACYJNY RUCHU POCIĄGU

Dla potrzeb realizacji analizy pierwszego z przytoczonych wypadków kolejowych opracowano program symulacyjny o dużym stopniu uniwersalności, który po koniecznej modyfikacji może służyć także do realizacji innych zadań, w tym także do analizy przebiegu drugiego z przytoczonych wypadków.

Model matematyczny ruchu pociągu towarowego oparto na bogato opisanych w literaturze przedmiotu podstawach teoretycznych, gdyż mechanika ruchu pociągu jest dyscypliną wystarczająco dobrze poznaną i opisaną w obszernej literaturze, m.in. w pracach [2, 4, 6, 8], będących podsumowaniem wieloletnich badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych.

Model pociągu (rys.1) stanowi układ 54 masy połączonych więzami sztywnymi (lokomoty-



Rys.1. Model fizyczny pociągu i jego współrzędne

wa i 53 wagony). Pominięcie własności sprężysto-tłumiących więzów łączących masy rzeczywistego układu mechanicznego jest uzasadnione znikomym wpływem dyssypacji energii kinetycznej pociągu (wynikającej z pracy zderzaków kolejowych) na drogę hamowania.

Model symulacyjny operuje kilkudziesięcioma stałymi i zmiennymi parametrami, z których najważniejsze w opisie formalnym modelu matematycznego ruchu pociągu to:

- s – współrzędna (droga) środka ciężkości lokomotywy,
- F_L – siła pociągowa lokomotywy,
- m_L – masa lokomotywy,
- ρ_L – współczynnik mas wirujących lokomotywy,

- m_W – masa wagonu wraz z ładunkiem,
 ρ_W – współczynnik mas wirujących wagonu,
 l_W – długość wagonu,
 n_W – liczba wagonów,
 w_L – jednostkowy zasadniczy opór biegu lokomotywy,
 w_W – jednostkowy zasadniczy opór biegu wagonu,
 e – jednostkowy lokalny opór wzniesienia,
 r – jednostkowy lokalny opór łuku,
 μ – współczynnik tarcia między klockiem hamulcowym a obręczą koła,
 N_L – siła docisku klocka hamulcowego do obręczy koła lokomotywy,
 n_{kL} – liczba klocków hamulcowych lokomotywy,
 N_W – siła docisku klocka hamulcowego do obręczy koła wagonu,
 n_{kW} – liczba klocków hamulcowych wagonu,
 v_h – prędkość fali hamowania,
 σ_i – współrzędna (droga) i -tego wagonu,
 τ_i – chwila zadziałania hamulca i -tego wagonu,
 s_R – współrzędna końca rozruchu,
 s_H – współrzędna początku hamowania,
 d – długość odcinka drogi, jaką przebył pociąg (2925 m).

Dla tak przyjętych oznaczeń, model matematyczny ruchu rozpatrywanego pociągu jest opisany równaniem różniczkowym zwyczajnym drugiego rzędu, o zmiennej strukturze, w następującej postaci:

$$(1 + \rho_P) m_P \ddot{s} = \begin{cases} R(s, \dot{s}, \sigma_i) & \text{dla } 0 \leq s \leq s_R \\ W(s, \dot{s}, \sigma_i) & \text{dla } s_R \leq s \leq s_H \\ H(s, \dot{s}, \sigma_i, \tau_i, \mu) & \text{dla } s_H \leq s \leq d \end{cases} \quad (1)$$

w którym funkcja R prawej strony równania jest opisem matematycznym fazy rozruchu pociągu, odbywającym się na długości s_R , funkcja W stanowi opis matematyczny fazy wybiegu, w której na pociąg działają wyłącznie siły oporów ruchu oraz funkcja H opisująca fazę hamowania pociągu, rozpoczynającą się w odległości s_H od semafora wyjazdowego (tarczy manewrowej) i trwająca do chwili uderzenia lokomotywy w koziół oporowy odległy od semafora wyjazdowego o odcinek $d = 2925$ m.

Postacie tych funkcji są następujące:

$$R = F_L(\dot{s}) + O_P \quad (2)$$

$$W = O_P, \quad (3)$$

$$H = O_P + H_P, \quad (4)$$

gdzie:

$$O_P = -g \left\{ m_L [w_L(\dot{s}) + e(s) + r(s)] + m_W \left\{ w_W(\dot{s}) + \sum_{i=1}^{n_W} [e(\sigma_i) + r(\sigma_i)] \right\} \right\} \quad (5)$$

$$H_P = - \left\{ n_{kL} N_L(\tau_i) \mu [N_L(\tau_i), \dot{s}] + \sum_{i=1}^{n_W} n_{kW} N_W(\tau_i) \mu [N_W(\tau_i), \dot{s}] \right\} \quad (6)$$

oraz:

$$m_P = m_L + m_W, \quad (7)$$

$$\rho_P = \frac{\rho_L m_L + \rho_W m_W}{m_P}, \quad (8)$$

$$\sigma_i = s - i l_W, \quad (i=1 \dots n_W), \quad (9)$$

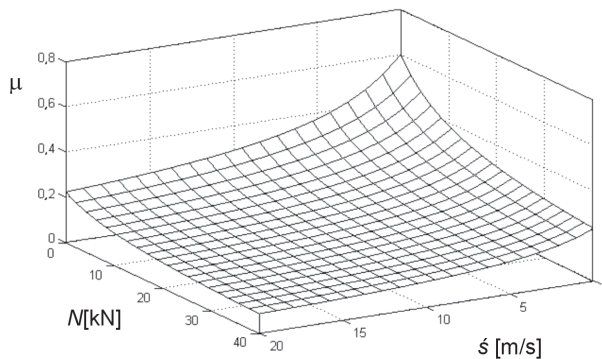
$$\tau_i = t + i \frac{l_W}{v_h}, \quad (i=1 \dots n_W). \quad (10)$$

Współczynnik tarcia μ między obręczą koła zestawu kołowego a żeliwną wstawką klocka hamulca klockowego opisano wzorem (11), zwanym w literaturze [2] wzorem *Karwackiego*:

$$\mu = k_0 \frac{(k_1 N + 1)(k_3 \dot{s} + 1)}{(k_2 N + 1)(k_4 \dot{s} + 1)} \quad (11)$$

gdzie po stosownym przeliczeniu jednostek:

$$\begin{aligned} k_0 &= 0,6, \\ k_1 &= 1,631 \cdot 10^{-5} [\text{N}^{-1}], \\ k_2 &= 8,155 \cdot 10^{-5} [\text{N}^{-1}], \\ k_3 &= 3,6 \cdot 10^{-2} [\text{sm}^{-2}], \\ k_4 &= 1,8 \cdot 10^{-1} [\text{sm}^{-1}]. \end{aligned}$$

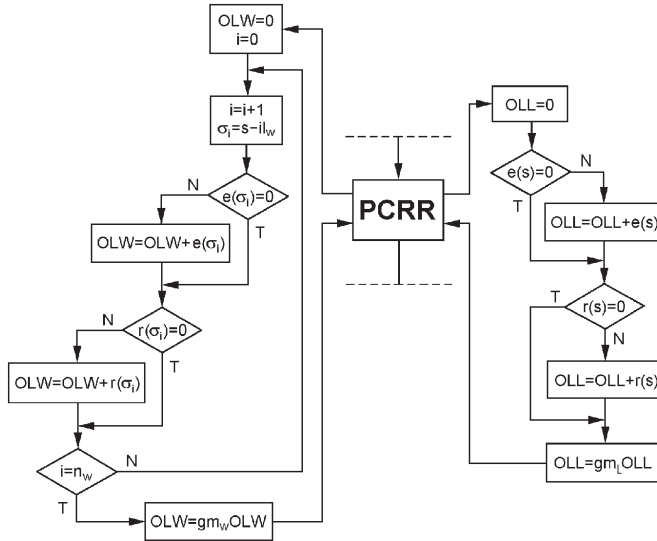


Rys. 2. Współczynnik tarcia μ pomiędzy obręczą koła zestawu kołowego a żeliwną wstawką klocka hamulca klockowego [2]

Przestrzenny obraz funkcji opisanej wzorem (11) przedstawiono na rysunku 2. Wynika z niego silna nieliniowość współczynnika tarcia μ między obręczą koła zestawu kołowego a żeliwną wstawką klocka hamulca klockowego.

Model cyfrowy umożliwi analizę ruchu pociągu przy wariantowym rozłożeniu mas w wykolejonej części pociągu oraz wariantowym rozłożeniu wagonów z działającymi hamulcami.

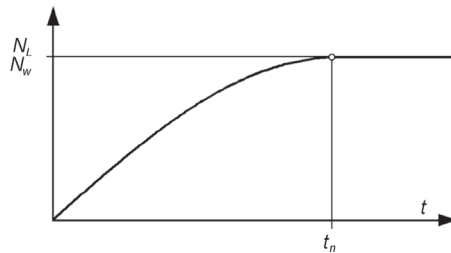
Program oblicza siły lokalnych oporów ruchu lokomotywy i kolejnych wagonów w danej chwili, w zależności od ich aktualnego położenia w stosunku do profilu pionowego i poziomego toru. Schemat algorytmu tych obliczeń przedstawiono na rysunku 3. Blok oznaczony



Rys. 3. Schemat algorytmu obliczeń sił lokalnych oporów ruchu lokomotywy i wagonów

symbolem **PCRR** jest podprogramem całkowania równania różniczkowego ruchu pociągu. Zmienne OLW oraz OLL oznaczają odpowiednio opory lokalne wagonów i opory lokalne lokomotywy. W modelu uwzględniono także wpływ zużycia obręczy zestawów kołowych na energię kinetyczną wagonów [7].

Krzywą napełniania cylindrów hamulcowych modelowano w sposób właściwy dla długich pociągów towarowych [6]. Oznacza to, że fazę napełniania cylindrów hamulcowych i wzrostu siły docisku klocków hamulcowych do obręczy koła zestawu kołowego opisano za pomocą pierwszej ćwiartki sinusoidy (rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyka narastania siły docisku klocków hamulcowych do obręczy koła zestawów kołowych
 $0=t_n$ – pierwsza ćwiartka sinusoidy, t_n – czas napełniania cylindrów hamulcowych [6]

Model symulacyjny uwzględniał również możliwość eksploatacyjnych zmian sprawności przedkładni hamulcowej wagonów towarowych oraz sił docisku klocków hamulcowych do obręczy.

Badania symulacyjne były prowadzone dla pełnego cyklu pracy pociągu (rozruch spod tarczy manewrowej, wybieg, hamowanie i ewentualne luzowanie hamulca). Do modelowania fazy rozruchu pociągu wykorzystano charakterystykę trakcyjną lokomotywy spalinowej TEM2 [5].

Program symulacyjny, realizujący obliczenia w trybie interakcyjnym, umożliwił śledzenie na ekranie bieżących parametrów ruchu badanego pociągu (przyspieszenie, prędkość i drogę) w czasie rzeczywistym (zegarowym).

Dla ułatwienia porównania symulowanego przebiegu z przebiegiem rzeczywistym zastosowano na ekranie monitora wyświetlanie (oprócz bieżących wartości parametrów jazdy) animowanego położenia pociągu na trasie jazdy, wraz z położeniem niektórych obiektów stałych (tarcza manewrowa, kładka nad torami, nastawnia ZKA oraz kozioł oporowy) na tle profilu pionowego i poziomego toru. Na ekranie były sygnalizowane także stany, w jakich znajdował się układ napędowy lub układ hamowania pociągu (rozruch, wybieg, hamowanie, luzowanie hamulca). Ponadto, gdy w wyniku warunków ruchowych nastąpiło zakleszczenie zestawów kołowych wagonów, wówczas na ekranie wyświetlał się komunikat „poślizg”.

Po zakończeniu obliczeń w ramach pojedynczego cyklu symulacyjnego, wyniki były przedstawiane na wykresie w formie ekranowej lub rysunku ploterowego, po uprzednim zapisaniu rekordów wynikowych w pliku przeznaczonym do dalszego wykorzystania przez urządzenie zewnętrzne.

Mimo że program – z założenia – był wykonany wyłącznie do realizacji badań symulacyjnych, w celu odtworzenia ruchu pociągu do chwili jego wykolejenia się na wjeździe do stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa, jednak był on programem stosunkowo obszernym, zawierającym ponad 1100 instrukcji kodowanych w języku *Borland Pascal* v.7. Program ten jest równocześnie na tyle uniwersalny, że po niewielu modyfikacjach został zastosowany do analizy drugiego z opisywanych przypadków; obecnie może być wykorzystywany do celów dydaktycznych.

3. BADANIA SYMULACYJNE PRZEBIEGU JAZDY I PRZYCZYN BRAKU HAMOWNOŚCI POCIĄGU TOWAROWEGO

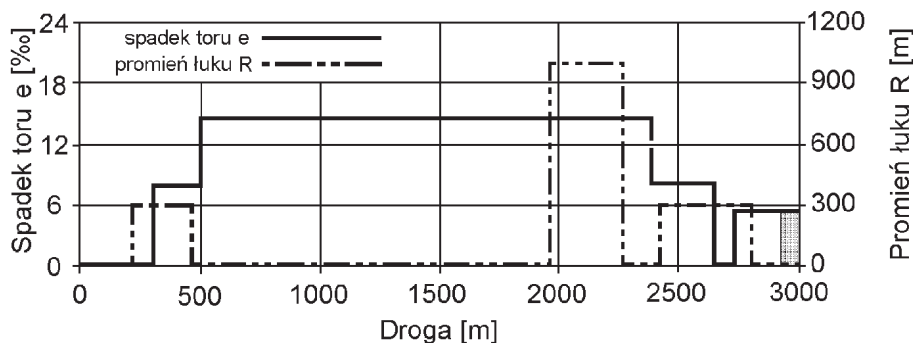
3.1. Uwagi wstępne

Omawiane wykolejenie pociągu towarowego wydarzyło się w dniu 16.12.1990 r. na stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa. W tym dniu o godz. 9.13 spod tarczy manewrowej boczniccy kolejowej Zakładów Koksowniczych „Przyjaźń” wyjechał w kierunku stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa pociąg złożony z lokomotywy spalinowej TEM2 oraz 53 wagonów. Całkowita masa pociągu wynosiła 2627 t, zaś jego długość – około 747 m.

W czasie jazdy pociągu po spadku maszynista stwierdził brak znamion hamowania. Za pośrednictwem radiotelefonu zawiadomił o zaistniałym fakcie obsługę stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa, która skierowała pociąg na tzw. żeberko ochronne, na którym – po uderzeniu z prędkością około 54 km/h w kozioł oporowy – nastąpiło wykolejenie pociągu. Wykoleiło się i zniszczyło w różnym stopniu 21 wagonów wraz z lokomotywą.

Długość drogi między tarczą manewrową boczniccy kolejowej Zakładów Koksowniczych „Przyjaźń” a kozłem oporowym żeberka ochronnego stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa – obliczona na podstawie dokumentacji geodezyjnej – wynosiła 2925 m. Szczególną cechą układu torowego boczniccy kolejowej, łączącej Zakłady Koksownicze „Przyjaźń” ze stacją Dąbrowa Górnicza Towarowa, jest duży spadek toru (największy o wartości 14,65%), który stano-

wi 65% drogi łączącej tarczę manewrową bocznicy z kozłem oporowym żeberka ochronnego. Pionową (spadek toru) i poziomą (usytuowanie łuków toru i wielkość ich promieni) charakterystykę toru przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Pionowy i poziomy profil toru łączącego bocznice kolejową koksowni ze stacją (od tarczy manewrowej do kozła oporowego)

Katastrofie towarzyszyły trudne warunki atmosferyczne. Ranna pora, temperatura powietrza bliska 0° C, niewielki opad śniegu, oblodzone szyny oraz występowanie węglowodnorodnych zanieczyszczeń na powierzchniach główek szyn w istotny sposób obniżyły współczynnik przyczepności pomiędzy kołem a szyną.

3.2. Hipotetyczne przyczyny katastrofy

Po wykonaniu czynności wstępnych i rozpoznawczych wytypowano dwie najbardziej prawdopodobne hipotezy dotyczące przyczyn katastrofy:

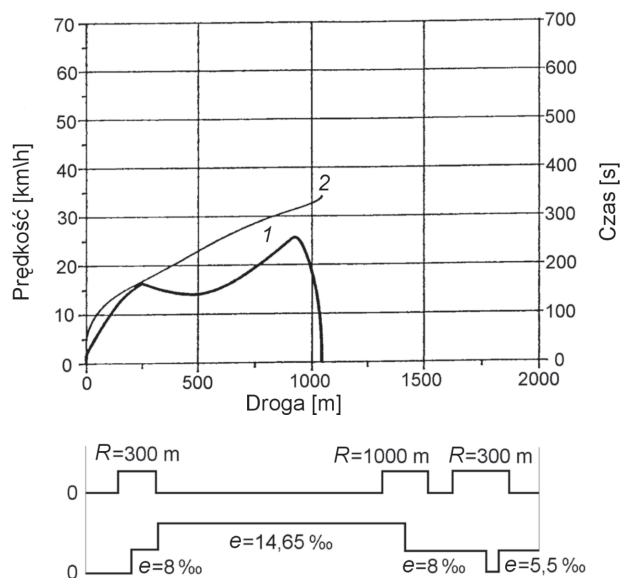
- 1) niesprawność dużej, lecz nieznannej części układu hamulcowego pociągu, na co wskazuje znaczna prędkość końcowa pociągu (w chwili uderzenia w kozioł oporowy żeberka ochronnego wynosiła około 54 km/h);
- 2) zakleszczenie i poślizg (do zderzenia z kozłem oporowym) zestawów kołowych wagonów w trakcie hamowania na spadku, wskutek niekorzystnych i specyficznych warunków atmosferycznych oraz terenowych.

We wstępnym etapie analizy pierwsza z hipotez wydawała się być znacznie bardziej prawdopodobna. Po zakończeniu rozruchu pociąg miał niewielką prędkość (rzędu 15 – 16 km/h), a połowa liczby jego wagonów znajdowała się jeszcze na torze poziomym. Wydawało się mało prawdopodobne, by na tak niewielkim odcinku drogi, nawet przy dużym spadku toru, pociąg uzyskał tak znaczną prędkość przy prawidłowym działaniu hamulców w większości wagonów w pociągu.

3.3. Badania symulacyjne hipotetycznych przyczyn katastrofy

Przyjęte wstępnie założenia dotyczące przyczyn powodujących wystąpienie braku niezbędnej siły hamowania oraz wynikające z tego konsekwencje sprowadzono do analizy symulacyjnej czterech podstawowych przypadków. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 6, 7, 8 i 9.

W przypadku pierwszym (rys. 6) założono, że lokomotywa oraz wagony z działającymi prawidłowo hamulcami realizują tylko 50% maksymalnej siły hamującej. Można to interpre-



Rys. 6. Symulowany ruch pociągu towarowego w przypadku hamowania 26 wagonów ($\approx 50\%$ składu pociągu)
 1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy

tować również jako przypadek, gdy tylko 50% wagonów z włączonymi hamulcami realizuje nominalną siłę hamowania, pozostałe zaś wagony pociągu nie hamują. Jednak prawdopodobieństwo, że czynniki mechaniczne były przyczyną niezadziałania zaworów rozrządczych w 50% wagonów, było znikomo małe. Jak wynika z przedstawionych na rysunku 2 wyników symulacji, przy powyższych założeniach, pociąg powinien zatrzymać się przed kozłem oporowym w znacznej odległości.

W drugim przypadku założono, że po rozpoczęciu hamowania wszystkie zestawy kołowe hamowanych wagonów wpadają w poślizg i pociąg przemieszcza się na zakleszczonych zestawach kołowych. Przyjęto dla tego przypadku, że współczynnik tarcia ślizgowego w układzie *koło – szyna* wynosi $\mu = 0,05$.

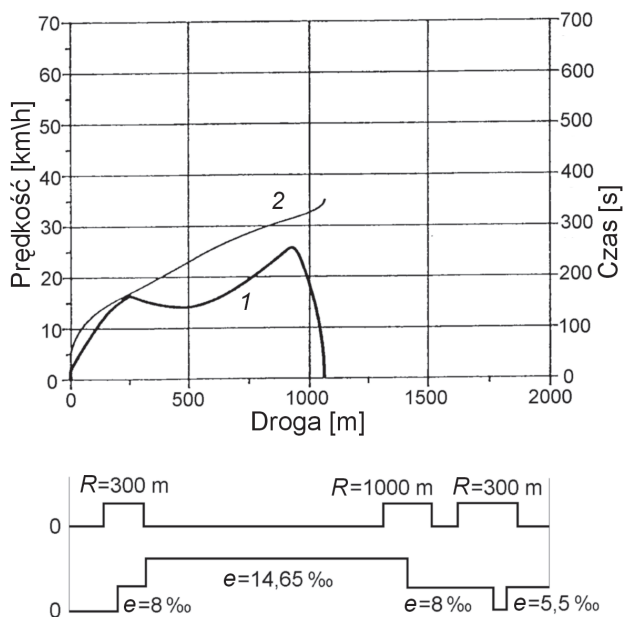
Warunki przyczepności, spowodowane czynnikami atmosferycznymi (oblodzone szyny, padający śnieg oraz obecność zanieczyszczeń węglowodorkowych na powierzchni główek szyn) sprzyjały powstaniu poślizgu. Mimo to pociąg również powinien był zatrzymać się przed kozłem oporowym, co wynika z wykresu umieszczonego na rysunku 7.

W trzecim przypadku założono (rys. 8), że zarówno lokomotywa, jak i wszystkie wagony pociągu nie hamują. W tym przypadku pociąg uderza w kozioł oporowy żeberka ochronnego z prędkością 58,2 km/h.

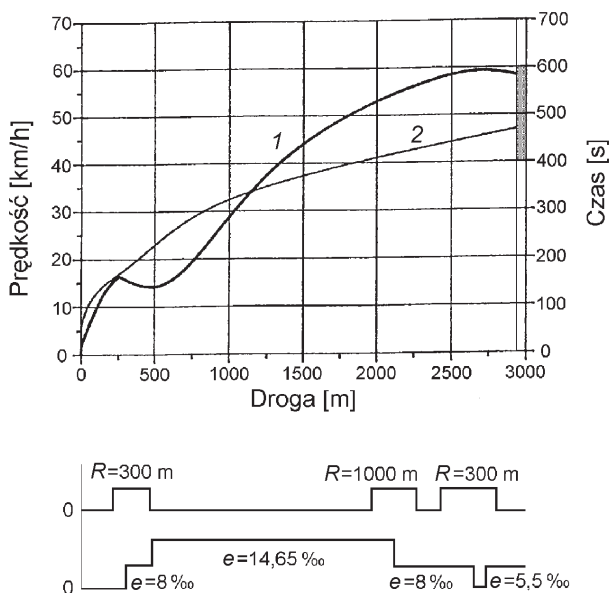
W czwartym przypadku (rys. 9) założono, że pociąg jest hamowany wyłącznie hamulcem lokomotywy. Przy tym założeniu pociąg uderza w kozioł oporowy żeberka ochronnego z prędkością 54,2 km/h.

Z przedstawionych analizowanych wariantów możliwych sytuacji ruchowych, jedynie w dwóch ostatnich uzyskano dużą zbieżność charakterystyk prędkości z zapisem na taśmie prędkościomierza lokomotywy TEM2. Na tej podstawie wysnuto hipotezę, graniczącą z pewnością, iż żaden z wagonów badanego pociągu nie hamował.

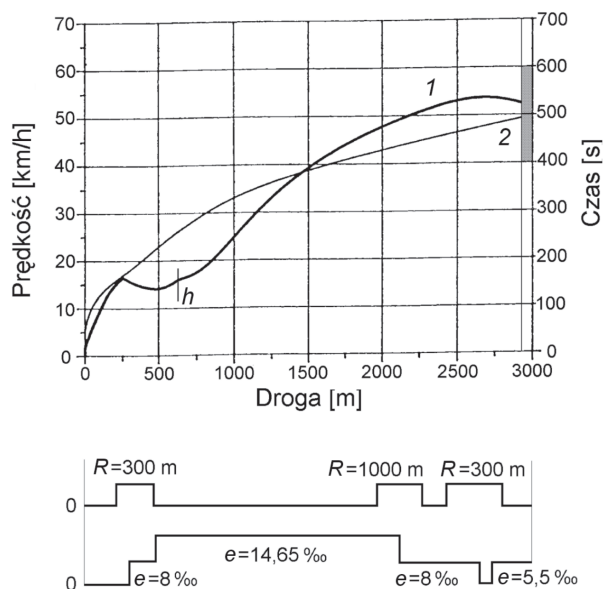
W ocenie prawdopodobieństwa wystąpienia jednego z dwóch ostatnich rozważanych przypadków (brak hamowania lub hamowanie tylko lokomotywą) porównywano symulo-



Rys. 7. Symulowany ruch pociągu towarowego w przypadku hamowania z pełnym poślizgiem całego pociągu
 1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy, współczynnik tarcia pomiędzy kołem a szyną $\mu = 0,05$



Rys. 8. Symulowany ruch pociągu w przypadku braku hamowania
 1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy



Rys. 9. Symulowany ruch pociągu w przypadku hamowania wyłącznie hamulcem lokomotywy
 1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy, h – początek hamowania

waną prędkość pociągu z prędkością zarejestrowaną na taśmie prędkościomierza nie tylko co do wartości końcowej; porównywano także kształt tych przebiegów na całym odcinku drogi, obserwując bardzo duże ich podobieństwo¹. Na wykresie przedstawionym na rysunku 9 symbolem *h* oznaczono moment wszczęcia hamowania przez maszynistę.

Dalsze czynności dochodzeniowe, uwzględniające także wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych przez autora, dowiodły, że wskutek błędów obsługi i czynników organizacyjnych, pociąg był hamowany wyłącznie hamulcem lokomotywy i jednego wagonu (pierwszego za lokomotywą); jest to zbieżne z wynikami badań symulacyjnych, przedstawionych na rysunku 9.

Ustalony przebieg zdarzenia był następujący: od stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa przyjechała lokomotywa TEM2, pchając przed sobą załadowany chemikaliami czteroosiowy wagon kryty. Po dojechaniu do oczekującego składu 52 wagonów węglarek, stojącego na torach boczniczy kolejowej koksowni, połączono wagon kryty z pierwszą węglarką sprzęgiem śrubowym i sprzęgiem hamulcowym, lecz nie otwarto kurków końcowych i nie wykonano próby hamulca. Tym sposobem skład pociągu był hamowany wyłącznie hamulcem lokomotywy i wagonu krytego, przy czym (na ogół) rzeczywisty procent masy hamowanej lokomotyw różni się od jego wartości nominalnych.

3.4. Hipotetyczne warunki uniknięcia katastrofy

Obrana metoda badawcza umożliwiła także sprawdzenie hipotetycznej możliwości uniknięcia katastrofy lub ograniczenia jej skutków. Okoliczności katastrofy wskazywały, że było

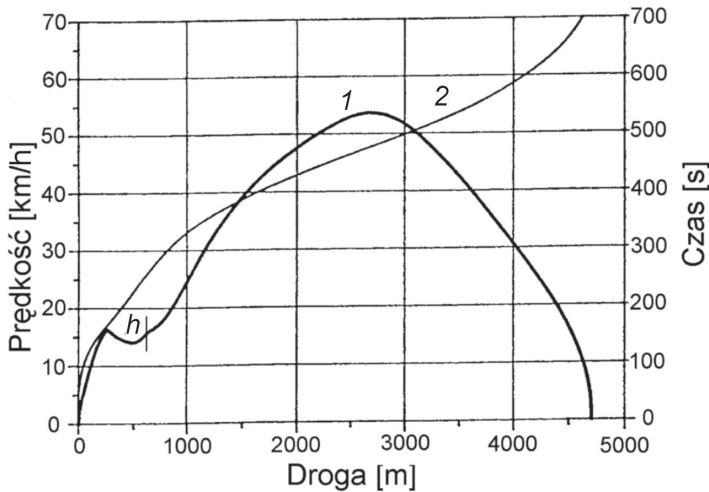
¹ Analizowana taśma rejestratora RT9 nie została zachowana do czasu przygotowania niniejszej pracy.

możliwe jej uniknięcie, pod warunkiem że w stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa w tym czasie były tory niezajęte przez inne pociągi towarowe.

Maszynista lokomotywy, zgłaszając przez radiotelefon brak hamowania pociągu, sam zasugerował przyjęcie pociągu na tzw. „wybieg”. Czas, jakim mogła dysponować obsługa nastawni stacji na ustawienie drogi przebiegu, oszacowano na około 4 minuty; jest to czas dostatecznie długi na przeprowadzenie tej czynności, bowiem od chwili ruszenia pociągu spod semafora wyjazdowego bocznicy do chwili uderzenia w kozioł oporowy upłynęło około 8 minut.

W celu oszacowania niezbędnej długości torów stacyjnych potrzebnych do zatrzymania pociągu niehamowanego lub hamowanego przez lokomotywę wykonano wiele eksperymentów symulacyjnych. Założono w nich, że droga powyżej 2925 m odpowiada odcinkowi toru poziomego i prostego. Obliczenia wykonano dla pociągu 53- i 40-wagonowego.

Na rysunku 10 przedstawiono przebieg procesu zatrzymywania pociągu 53-wagonowego, hamowanego przez lokomotywę. Całkowita droga przebyta przez pociąg od tarczy ma-

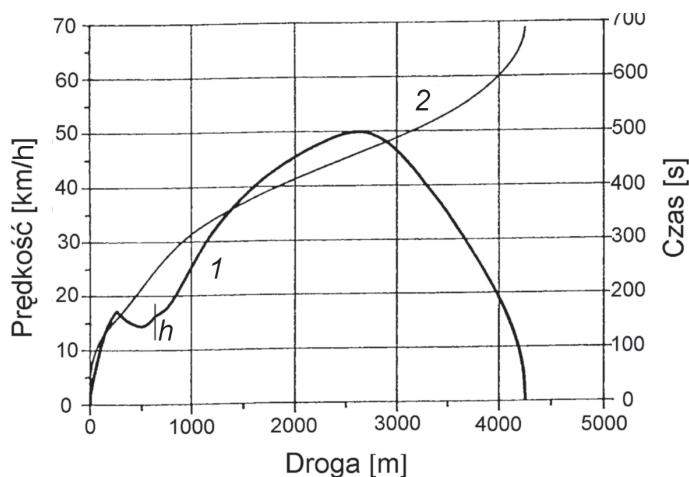


Rys.10. Symulowany ruch pociągu 53-wagonowego, hamowanego wyłącznie hamulcem lokomotywy
1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy, h – początek hamowania

nawrowej bocznicy kolejowej do zatrzymania wynosi 4703 m. Zatem wymagana długość torów stacyjnych potrzebna do zatrzymania pociągu wynosiła jedynie około 1780 m, co stanowiło niecałe 2,5 długości wykolejonego pociągu. Gdyby pociąg składał się – zgodnie z przepisami – z czterdziestu wagonów, wówczas wymagana długość wolnych torów stacyjnych wynosiłaby około 1320 m (rys.11), zatem niecałe 2 długości pociągu.

Należy zwrócić uwagę na to, że omawiane obliczenia symulacyjne nie uwzględniają istotnego wzrostu oporów ruchu, związanego z przejazdem przez zwrotnice, których na drodze przebiegu mogło wystąpić kilka lub kilkanaście. Dla najbardziej niekorzystnego przypadku (niehamowany pociąg 53-wagonowy) potrzebna długość torów stacyjnych wyniosłaby 3362 m. Wynika stąd wniosek, że przyjęcie na tzw. „wybieg” pociągu na tor o długości około 3,5 km pozwoliłoby uniknąć zderzenia i poważnych szkód materialnych.

W omawianych powyżej hipotetycznych przypadkach nie uwzględniano dodatkowych możliwości wcześniejszego zatrzymania pociągu, jak np. przez użycie płozów hamulcowych.



Rys.11. Symulowany ruch pociągu w przypadku wybiegu pociągu 40-wagonowego hamowanego wyłącznie hamulcem lokomotywy

1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy, h – początek hamowania

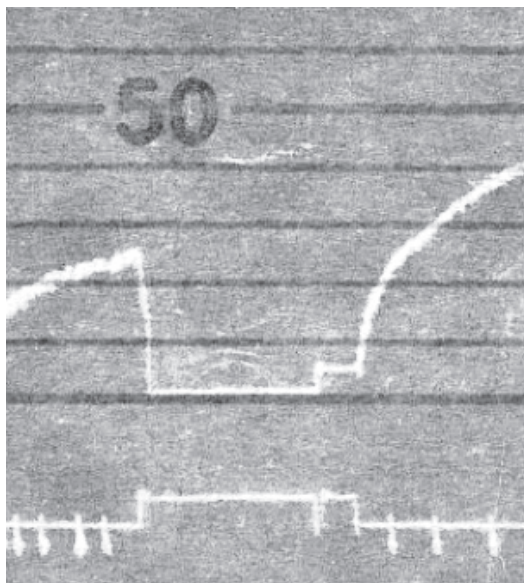
4. SYMULACJA PRZEBIEGU HAMOWANIA POCIĄGU TOWAROWEGO LINII LHS

Jak wspomniano we wprowadzeniu, w pobliżu miejscowości Strzegomek (powiat staszowski) zdarzył się wypadek kolejowy na szerokotorowej linii kolejowej LHS, którego ofiara poniosła śmierć na miejscu. Działo się to 20.07.2003 r. około godz. 7.15. Obrażenia na ciele ofiary były stosunkowo nieznaczne, stąd w postępowaniu prokuratorskim wystąpiła pewna wątpliwość, dotycząca bezpośredniej przyczyny śmierci. Zwykle ofiary potrąceń przez pociąg mają obrażenia o wiele bardziej rozległe.

Stało się zatem konieczne przeprowadzenie za pomocą symulacji komputerowej analizy przebiegu procesu hamowania pociągu oraz zachowania się maszynisty, bowiem wyznaczenie samej drogi hamowania pociągu metodami obliczeniowymi byłoby działaniem nieskutecznym i obciążonym bardzo dużym błędem. Ponadto, istniejących empirycznych formuł obliczeniowych nie stosuje się dla prędkości mniejszych niż 70 km/h.

Celem symulacji komputerowej było nie tylko wyznaczenie drogi hamowania pociągu, lecz również oszacowanie prędkości pociągu w chwili potrącenia ofiary oraz czasu, jaki upłynął od chwili identyfikacji przeszkody na torze jako człowieka do chwili potrącenia go.

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych opisywanego wypadku wykorzystano uproszczoną i zmodyfikowaną wersję programu zastosowanego do badań symulacyjnych opisanych powyżej. Istotnym utrudnieniem realizacji eksperymentów symulacyjnych hamowania pociągu była mała prędkość początkowa pociągu, dodatnie niewielkie przyspieszenie na początku hamowania i stosunkowo krótki czas hamowania, co jest uciążliwe na przedstawionym wycinku taśmy prędkościomierza RT9 prowadzącej lokomotywy ST44-2027 (rys. 12).

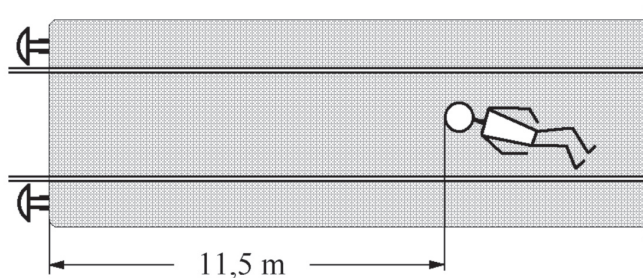


Rys. 12. Wycinek taśmy prędkościomierza prowadzącej lokomotywy ST44-2027

Podstawowe parametry modelu symulacyjnego hamowania (np. czas napełniania cylindrów hamulcowych wagonów) podlegają fluktuacji, lecz w granicach określonych stosownymi przepisami ruchu. Dodatkowe utrudnienie to długość pociągu, składającego się z dwóch lokomotyw ST44 oraz 44 czteroosiowych wagonów węglarek, co wynosi około 660 m. Jak wynika z zapisu na taśmie prędkościomierza, prędkość początkową hamowania można oszacować w granicach $22 \div 24$ km/h.

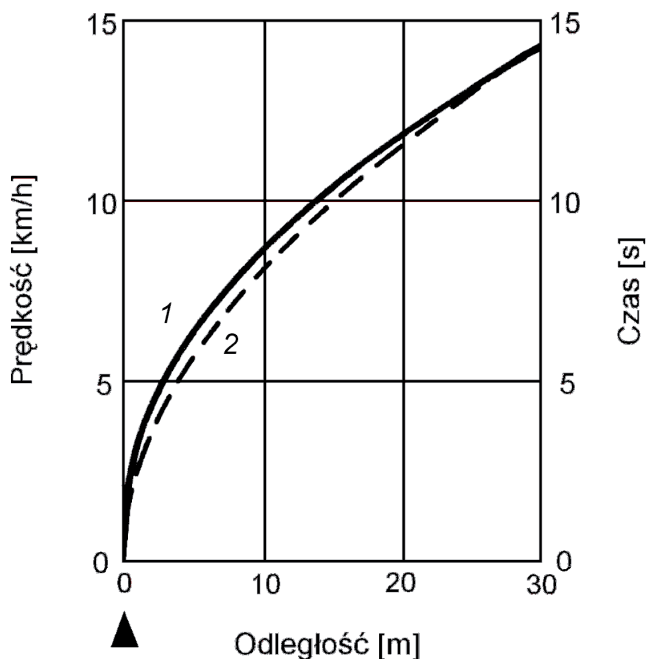
Uwzględniając fluktuacje parametrów modelu symulacyjnego – po licznej serii eksperymentów symulacyjnych – stwierdzono, że najbardziej prawdopodobny zakres zmienności drogi hamowania pociągu w zaistniałych warunkach mieścił się (w zaokrągleniu do pełnego metra) w przedziale $101 \div 124$ m, a wartość średnia wynosiła 112,5 m.

W analogiczny sposób wyznaczano czas hamowania (od wszczęcia hamowania do zatrzymania pociągu), którego średnią wartość oszacowano jako równą 29 s. Po uwzględnieniu sytuacji terenowej i położenia ciała ofiary wypadku w stosunku do zgarniacza lokomotywy prowadzącej (rys. 13) wyznaczono szacunkową prędkość, z jaką jechała lokomotywa w chwili



Rys. 13. Szkic sytuacyjny położenia ofiary wypadku względem czoła prowadzącej lokomotywy ST44-2027

potracenia ofiary. Wartość ta wynosiła około 9 km/h; wyznaczono ją na podstawie przedstawionego na rysunku 14 wykresu prędkości pociągu na odcinku 30 m przed punktem zatrzymania



Rys. 14. Prędkość i czas dojazdu lokomotywy do punktu zatrzymania
1 – prędkość jazdy, 2 – czas jazdy

nia. Wykres ten jest lustrzanym odbiciem końcowego odcinka krzywej hamowania pociągu. Na wykresie tym przedstawiono także czas dojazdu pociągu do punktu zatrzymania.

Wyniki badań symulacyjnych – przedstawione właściwej prokuraturze rejonowej – rozstrzygnęły wątpliwości co do bezpośredniej przyczyny śmierci ofiary. Tym samym zastosowanie symulacji komputerowej przebiegu zdarzenia spełniło swoje zadanie.

5. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Mimo niepełnej wiedzy autora dotyczącej rzeczywistego przebiegu opisanej katastrofy kolejowej na stacji Dąbrowa Górnicza Towarowa, wynikającej także z rutynowego sposobu sporządzenia dokumentacji powypadkowej, hipotetyczna przyczyna katastrofy kolejowej wysunięta przez autora została potwierdzona w toku powypadkowego postępowania dochodzeniowego. Jak wynika z zaprezentowanych wyników badań, symulacja komputerowa, zastosowana w omawianym zagadnieniu, spełniła oczekiwania związane z hipotetycznym obrazem przebiegu zdarzeń. Potwierdza to

dostateczną wiedzę z zakresu mechaniki ruchu pociągów oraz możliwość skutecznego programowania oraz symulacji zjawisk związanych z ruchem pociągów kolejowych. Również w drugim z przytoczonych wypadków kolejowych zastosowanie symulacji komputerowej pozwoliło na jednoznaczne rozwianie wątpliwości dotyczących okoliczności śmierci ofiary wypadku.

Na marginesie niniejszych uwag końcowych należy stwierdzić, że dokumentacje powypadkowe zawierają na ogół wiele luk, które utrudniają późniejsze analizy przebiegu oraz przyczyn wypadków kolejowych, a tym samym precyzyjne ustalenie zakresu odpowiedzialności stosownych podmiotów i osób za zaistniałe skutki. Zdaniem autora, procedury i dokumentacja powypadkowa powinny stanowić określony standard i mieć odpowiedni certyfikat, zatwierdzony przez Państwową Komisję Badania Wypadków Kolejowych.

Problem ten został dostrzeżony również w obszernej publikacji [10], dotyczącej analizy przyczyn katastrofy kolejowej, która wydarzyła się 5 października 1999 r. w pobliżu podlondyńskiej stacji Paddington. Katastrofa ta może zostać uznana jako najpoważniejszy wypadek na kolejach brytyjskich, bowiem w jej wyniku zginęło 31 osób (w tym dwóch maszynistów), a kilkadziesiąt innych zostało rannych, w tym wielu ciężko. Autorzy przytoczonej publikacji uznali, w wyniku wstępnej analizy systemowej katastrofy, że jej praprzyczyną była błędna koncepcja realizacji prywatyzacji kolei BR, która nastąpiła w 1994 r. Jej wynikiem była głęboka fragmentaryzacja struktury kolei, co przy braku właściwych relacji pomiędzy dużą ilością operatorów doprowadziło w konsekwencji do istotnego zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Znacznie bardziej dosadnie to zagadnienie zostało sformułowane we wcześniejszej publikacji [3], w której tytule już zawarto tezę o bezpośrednim wpływie fragmentaryzacji brytyjskiego rynku kolejowego na obniżenie poziomu bezpieczeństwa ruchu. W opisanych pięciu największych katastrofach, które zdarzyły się w latach 1997 – 2002, zginęło łącznie 59 osób; przyczynami tych katastrof były czynniki bezpośrednio wynikające z prywatyzacji kolei brytyjskich, zakończonej praktycznie w marcu 1997 r.

Uwzględniając postępujące w kraju procesy prywatyzacji i fragmentaryzacji rynku usług kolejowych, należy wziąć pod uwagę ich potencjalne skutki w postaci obniżenia poziomu bezpieczeństwa ruchu kolejowego oraz wykorzystać wnioski płynące z tragicznych doświadczeń kolei brytyjskich.

BIBLIOGRAFIA

1. *Dżuła S., Kobielski A.*: Zastosowanie symulacji komputerowej w rekonstrukcji przyczyn katastrofy kolejowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996, nr 10, s. 25.
2. *Гребенюк П.Т., Долганов А.Н., Скворцова А.И.*: Тяговые расчеты. Справочник. Транспорт, Москва 1987.
3. *Hope R.*: Accidents Raise Fears about Britain's Fragmented Railway. *Japan Railway & Transport Review*, December 2002, nr 33, s. 32.
4. *Кантор И.И.*: Продольный профиль пути и тяга поездов. Транспорт, Москва 1984.
5. Katalog: Советские тепловозы. Энергомашэкспорт, Москва (bez roku wydania).
6. *Клыков Е.Б.*: К расчету тормозного пути грузовых поездов. Вестник ВНИИЖТ, 1971, nr 3, s. 24.

7. *Kobielski A.*: Energia kinetyczna wagonu towarowego. *Trakcja i Wagony*, 1991, nr 4 s. 85.
8. *Kobielski A.*: Symulacja komputerowa w analizie przebiegu i przyczyn wypadków kolejowych. XIII Warsztaty Naukowe PTSK, Kazimierz Dolny nad Wisłą, 2006 – materiały konferencyjne, 2006, s. 45.
9. *Prokop J., Pinkas C.*: Simulace jízdi vlaku. *Železniční technika*, 1990, nr 4, s. 165.
10. *Santos-Reyes J., Beard A.N.*: A systemic analysis of the Paddington railway accident. *Proc. ImechE Vol. 220 Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2006, s. 121.