

Mieczysław Borysiewicz*, Wanda Kacprzyk*

**OCENA RYZYKA W TRANSPORCIE KOLEJOWYM
MATERIAŁÓW NIEBEZPIECZNYCH, CZ. I – METODYKA**

**RISK ASSESSMENT OF RAIL TRANSPORTATION
OF DANGEROUS MATERIALS, PART I – METHODOLOGY**

Słowa kluczowe: oszacowanie ryzyka, transport materiałów niebezpiecznych, wykolejenie, kolizja, utrata szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje.

Key words: risk estimation, transportation of dangerous goods, derailment, collisions, loss of containment.

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawy metod identyfikacji i oszacowań prawdopodobieństwa scenariuszy zdarzeń prowadzących do awaryjnego uwolnienia substancji niebezpiecznych do środowiska, transportowanych szlakami kolejowymi.

Uwzględniono różne mechanizmy prowadzące do kolizji i wykolejeń taboru przewożącego substancje niebezpieczne.

Summary

Current models for risk assessment of dangerous goods transportation by railways make use of different forms of simplified event tree and fault tree techniques or directly available statistical data or available statistical data to define frequencies of accident sequences leading to loss of containment (LOC) causing releases of hazardous substances to the environment. This analysis is followed by air dispersion calculations in order to estimate

* **Dr Mieczysław Borysiewicz, mgr Wanda Kacprzyk – Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Polityki Ekologicznej, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa; tel.: 22 629 41 35; e-mail: be@ios.edu.pl**

consequences, for the respective environment and local society in case of a number of selected event sequences. In general, these models do not account possible collision and derailment mechanisms.

In part I of the paper a general framework of enhanced model for LOC probability calculation is proposed. It takes into account the relevant mechanisms that could lead to derailment or collision. An additional element introduced to estimate LOC frequencies is the hot spot approach. Part II contains detailed description of the models relevant for the framework.

1. WPROWADZENIE

W Polsce przewozi się koleją rocznie około 20 mln ton towarów niebezpiecznych. Bliżko 90% tych towarów to ropa i produkty ropopochodne (benzyny i oleje napędowe), gazy techniczne (głównie propan–butan) oraz kwas siarkowy. Towary niebezpieczne przewożone są w wagonach-cysternach i w kontenerach-cysternach oraz jako przesyłki jednostkowe w wagonach krytych i odkrytych (węglarki, platformy) oraz w kontenerach.

Zasady wykonywania przewozu tych towarów określono w następujących aktach prawnych:

- ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym,
- ustawa z dnia 31 marca 2004 r. o przewozie koleją towarów niebezpiecznych oraz m.in. w następujących przepisach o przewozie towarów niebezpiecznych:
 - Regulamin dla międzynarodowego przewozu kolejami towarów niebezpiecznych (RID),
 - Umowa o międzynarodowej kolejowej komunikacji towarowej (SMGS) – Załącznik 2. Przepisy o przewozie towarów niebezpiecznych,
 - Konwencja o przewozie towarów kolejami (COTIF)– Załącznik B. Umowa międzynarodowego przewozu towarów kolejami – przewozy krajowe i międzynarodowe.

W latach 2006–2008 przeprowadzono na zlecenie GIOŚ badania przewozu towarów niebezpiecznych w województwach przygranicznych. Szczegółowe wyniki tych badań są zawarte w raportach dla GIOŚ [Borysewicz 2006–2008]. Ilości towarów niebezpiecznych przewożonych w transporcie kolejowym w latach 2005 i 2006 (dla obszaru Polski) zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ilości przewożonych towarów niebezpiecznych koleją w Polsce w latach 2005 i 2006, z podziałem na klasy według RID

Table 1. Amount of hazardous materials of different RID classes transported in Poland by railways in 2005 and 2006 years

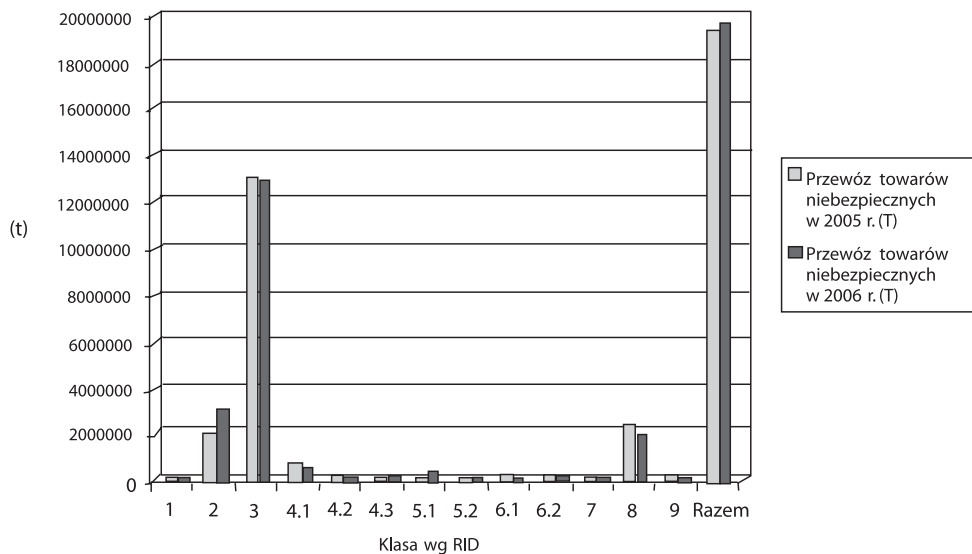
Klasa wg RID	Przewóz towarów niebezpiecznych* w 2005 r. (Mg)	Przewóz towarów niebezpiecznych* w 2006 r. (Mg)
1	27 701	14 310
2	2 094 309	3 016 677
3	13 055 974	12 953 276
4,1	744 922	590 335
4,2	129 846	125 882
4,3	16 950	13 240
5,1	237 313	332 181
5,2	67	979
6,1	312 627	261 135
6,2	–	–
7	314	268
8	2 450 484	2 086 885
9	243 731	279 804
Razem	19 314 238	19 674 972

* Dane udostępnione przez Urząd Transportu Kolejowego w Warszawie.

Ilościowe dane zawarte w tabeli 1 przedstawiono na wykresie (rys. 1) w celu zobrazowania udziału poszczególnych klas materiałów niebezpiecznych w ogólnym transporcie tych materiałów.

Dominującą pozycję w ogólnym kolejowym transporcie materiałów niebezpiecznych – zarówno w roku 2005, jak i w roku 2006 – zajmowały materiały niebezpieczne klasy 3 według RID (materiały ciekłe zapalne). Mniejszy udział miały odpowiednio materiały klas 2 (gazy), 8 (materiały żrące) i 4.1 (materiały stałe zapalne, materiały samoreaktywne oraz materiały samowzbuchowe stałe, odczulone).

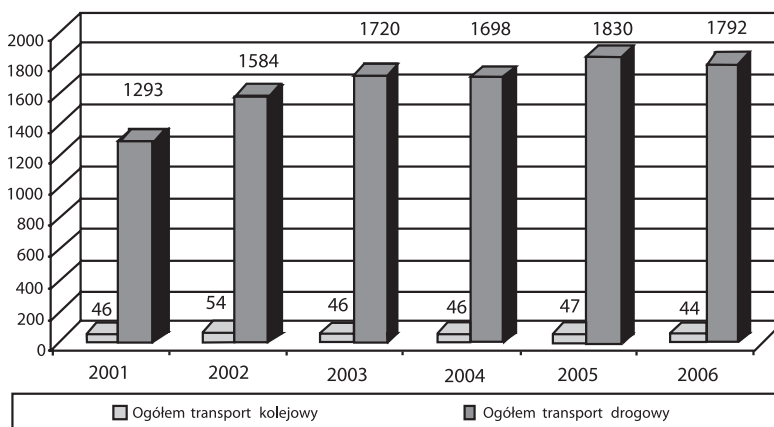
Dane statystyczne dotyczące liczby zdarzeń o charakterze chemiczno-ekologicznym, które wystąpiły w Polsce w latach 2001–2006 w transporcie drogowym i kolejowym, przedstawiono na wykresie (rys. 2).



Źródło: Urząd Transportu Kolejowego.

Rys. 1. Ilości przewożonych towarów niebezpiecznych koleją w latach 2005 i 2006 z podziałem na klasy RID

Fig. 1. Amount of hazardous materials of different RID classes transported in Poland by railways in 2005 and 2006 years



Źródło: Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej – Krajowe Centrum Koordynacji Ratownictwa i Ochrony Ludności.

Rys. 2. Wypadki z udziałem materiałów niebezpiecznych w latach 2001–2006 w transporcie drogowym i kolejowym

Fig. 2. Number of accidents in Road and rail transportation of hazardous chemical materials in the years 2001–2006

2. STAN WIEDZY I OGRANICZENIA KLASYCZNYCH METOD OCENY RYZYKA

Oceny ryzyka związanego z transportem materiałów niebezpiecznych były prowadzone w wielu krajach [Borysiewicz 2006; Health and Safety Commission 1991; Saccomanno & Cassidy 1993; Hoj & Kroger 2001]. Cele takich ocen były różne włączając w to sprawdzenie wypełnienia wymagań prawnych i kryteriów akceptacji ryzyka [Ernst Basler & Partner 1998; Wald und Landwirtschaft (BUWAL) 1992], wyznaczanie optymalnych dróg przewozu z punktu widzenia zagrożeń środowiska i ludzi oraz optymalizację wielkości ładunków i strumieni transportowanych materiałów.

UWAGA! Metody ilościowych ocen ryzyka poważnych awarii wraz z powszechnie stosowanymi technikami wyznaczania prawdopodobieństwa wystąpienia ciągów zdarzeń awaryjnych (analiza drzew uszkodzeń i drzew zdarzeń) przedstawiono w załączniku do niniejszego artykułu.

W większości stosowane modele ocen ryzyka [Health and Safety Commission 1991; IAEA 1996; Saccomanno & Cassidy 1993; AVIV BV Consultants 1999; Argonne National Laboratory 2000] są oparte na bezpośrednim wykorzystaniu danych statystycznych dotyczących niesprawności całych systemów technicznych lub na przeprowadzeniu prostych analiz drzew uszkodzeń takich systemów na podstawie dostępnych danych dotyczących uszkodzeń ich elementów. Wykorzystywane jest to przy wyznaczeniu prawdopodobieństwa uwolnień substancji niebezpiecznych do otoczenia w wyniku utraty szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje w razie różnych ciągów zdarzeń awaryjnych, wynikających z niesprawności systemów technicznych i/lub działania człowieka. Kolejnym etapem analiz ryzyka jest obliczanie rozprzestrzeniania się substancji uwolnionych do środowiska w celu oszacowania skutków wyselekcjonowanej liczby ciągów zdarzeń awaryjnych dla ludzi i środowiska. Wyniki analiz przedstawia się najczęściej w postaci skumulowanej funkcji rozkładu (CCDF – *Complementary Cumulative Distribution Function*) wystąpienia określonych skutków.

Stosowane obecnie powszechnie techniki ocen ryzyka w transporcie substancji niebezpiecznych szlakami kolejowymi mają jednak pewne wady:

- nie umożliwiają przeprowadzenia zaawansowanych analiz mechanizmów, które prowadzą do wypadków i w rezultacie do utraty szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje (LOC – *Loss of Containment*);
- drzewa zdarzeń konstruowane na potrzeby analizy wystąpienia zdarzeń LOC są na ogół niewystarczające do reprezentowania złożonych sytuacji;
- modele nie umożliwiają uwzględniania informacji przestrzennych.

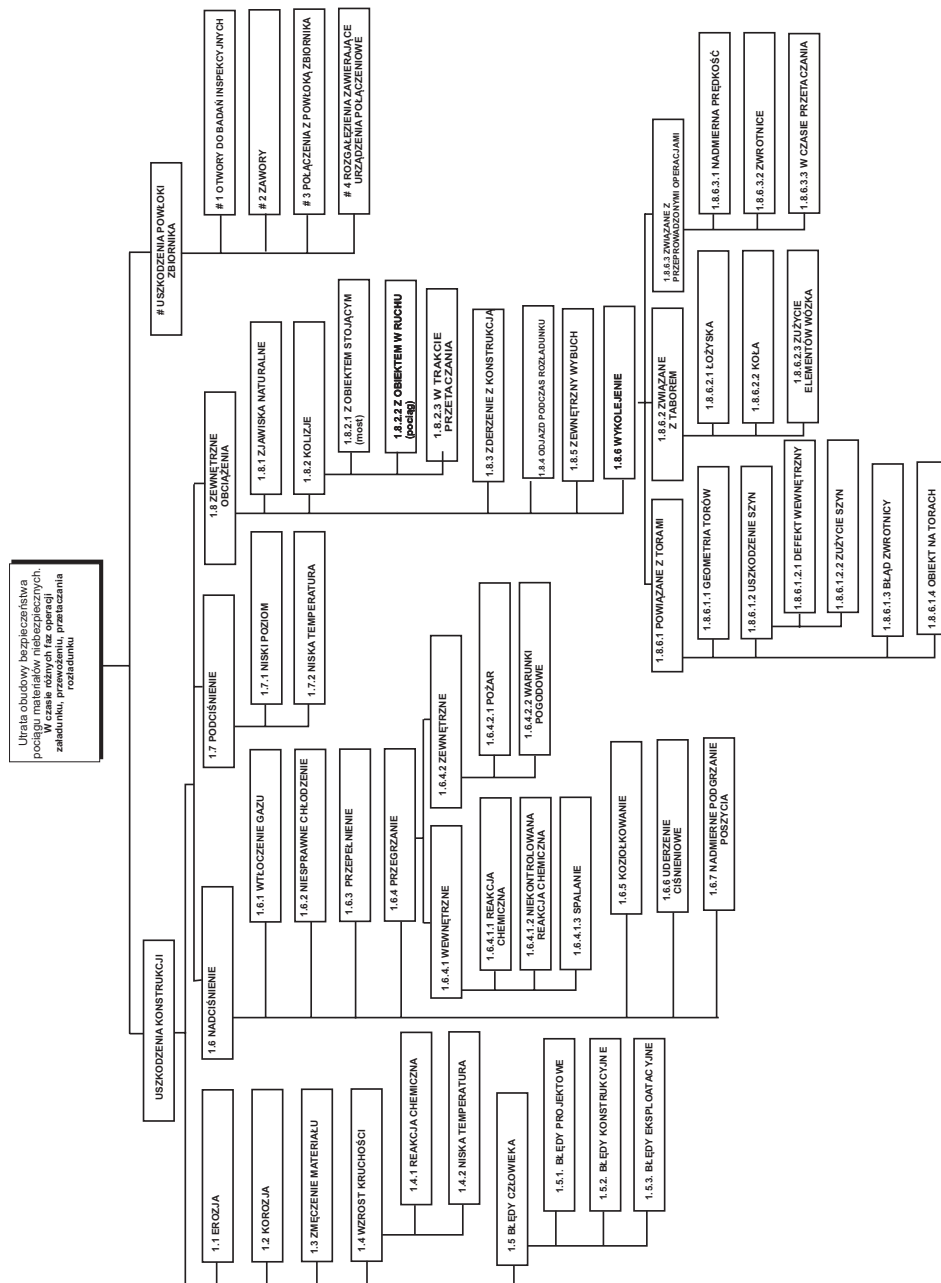
To wszystko wskazuje na konieczność przyjęcia bardziej zaawansowanego podejścia do oszacowań ryzyka związanego z transportem materiałów niebezpiecznych, pozbawionego wymienionych niedociągnięć. Przykłady prac mających to na celu podano w zamieszczonym w artykule piśmiennictwie. Są to publikacje [Maschio i in. 2004; Cozzani i in. 2004; Gheorghe i in. 2004]. Prezentowaną w niniejszym artykule nową metodykę analiz ocen ryzyka transportowego oparto głównie na tych pracach. Nowa metodyka obejmuje następujące kluczowe elementy:

- **Obliczenie prawdopodobieństwa utraty szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje (LOC).** Zamiast stosowania danych statystycznych zostaną zaproponowane odpowiednie modele dedukcyjne. Biorą one pod uwagę wszystkie istotne mechanizmy, które mogą prowadzić do wykolejenia lub kolizji, a w konsekwencji do wystąpienia zdarzenia LOC oraz umożliwiają uzyskanie danych statystycznych na poziomie poszczególnych elementów systemu kolejowego.
- **Obliczenie skutków wypadków, za pomocą zweryfikowanych modeli obliczeniowych.**
- **Podejście oparte na koncepcji gorących punktów (hot spot) w systemie transportu substancji niebezpiecznych.** Na podstawie przeprowadzonej analizy wypadków kolejowych z zastosowaniem takich technik, jak: wyznaczanie przyczyn podstawowych (*root causes*) i identyfikacja prekursorów wypadków, staje się widocznym, że wypadki zachodzą najczęściej w specyficznych miejscach analizowanego obszaru transportowego. Różne elementy infrastruktury kolejowej najczęściej wyznaczają takie gorące punkty.
- **Zaprezentowanie ryzyka.** Ryzyko jest przedstawione w postaci skumulowanej funkcji rozkładu, tzw. krzywej CCDF, oraz map zagrożonych obszarów. Wszystkie proponowane modele mogą być zintegrowane w postaci platformy oprogramowania, współpracującej z bazami własności chemicznych substancji i z systemami informacji przestrzennej (GIS).

3. OBLICZENIE PRAWDOPODOBIENSTWA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ LOC

3.1. Metoda obliczeń

W celu zidentyfikowania zdarzeń początkujących prowadzących do utraty szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje (tzn. wystąpienia zdarzeń LOC) wygodniej jest zastosować model podstawowego diagramu logicznego (MLD – *Master Logic Diagram*), który przypomina postać drzewa błędów. Na rysunku 3 przedstawiono ogólną postać takiego diagramu w zastosowaniu do zagadnień transportu kolejowego. Diagram uwzględnia wszystkie rodzaje zdarzeń inicjujących i prowadzących do wystąpienia zdarzeń LOC.



Rys. 3. Ogólny model podstawowego diagramu logicznego MLD dla LOC w zastosowaniu do zagadnień transportu kolejowego (w oparciu na publikacji Gheorghe i in. 2004)

Fig. 3. Master Logical Diagram for 'loss of containment' considerations related to the transportation of dangerous goods by rail (after Gheorghe et al. 2004)

3.2. Modelowanie wykolejenia i kolizji

Modelowanie wykolejenia obejmuje identyfikację zdarzeń początkujących, funkcje bezpieczeństwa i opracowanie poszczególnych modeli cząstkowych. Pomimo, że szczegółowe modele wymagają wzięcia pod uwagę specyficznych rozwiązań analizowanego systemu transportu, można wskazać na pewne ogólne zależności. I tak, wymienia się trzy podstawowe źródła bezpośrednich przyczyn:

- tory kolejowe,
- tabor,
- przeprowadzane operacje.

Listę głównych bezpośrednich przyczyn wykolejenia przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Bezpośrednie przyczyny wykolejenia

Table 2. Identified immediate causes of derailment

I. TORY KOLEJOWE
I.1. Uszkodzenie geometrii torów
<ul style="list-style-type: none"> • Poprzeczne lub pionowe wykrzywienie linii kolejowej lub zdeformowanie podsypu. • Degradacja podsypu w wyniku przesunięcia podkładu kolejowego. • Nieregularności w przekroju poprzecznym toru. • Niewłaściwe przechylenie toru. • Uszkodzenie mocowań wpływające na rozstęp torów. • Uszkodzenie podkładów kolejowych w wyniku reakcji chemicznych.
I.2. Uszkodzenie szyny
<ul style="list-style-type: none"> • Defekty wewnętrzne • Zużycie szyny • Uszkodzenie zwrotnicy • Pęknięcie szyny
I.3. Obcy przedmiot na szynach
<ul style="list-style-type: none"> • Obsunięcia terenu • Skały, głazy (w wyniku zdarzeń naturalnych lub wandalizmu) • Wrak wagonu z sąsiedniego torowiska • Wykolejony wagon z sąsiedniego toru • Drzewa lub szczątki naniesione przez huragany • Śnieg, lawiny • Opadające stalaktyty w tunelach • Zgubiony ładunek pociągu towarowego
I.4. Konserwacja torów
<ul style="list-style-type: none"> • Prace na torze zamkniętym dla ruchu • Prace na torze otwartym dla ruchu
II. TABOR
<ul style="list-style-type: none"> • Wytarty wałek lub tarcie łożyska lub hamulca • Uszkodzenie koła i wózka zwrotnego • Uszkodzenie komponentu wózka
III. PRZEPROWADZANE OPERACJE
<ul style="list-style-type: none"> • Nadmierna prędkość • Zmiana kierunku jazdy (zwrotnica) • Błędy podczas przetaczania wagonów na bocznicę

3.3. Modele obliczeniowe

Prawdopodobieństwo wystąpienia określonego stanu niesprawności systemu transportu (w tym wypadku wykolejenia lub zderzenia) może być oszacowane za pomocą trzech typów modeli:

- **modeli Markowa**, uwzględniających odnawialność komponentów systemu (torów lub taboru) w wyniku rutynowych inspekcji i napraw w razie zidentyfikowania istotnych uszkodzeń komponentów; modele takie mogą być stosowane w odniesieniu do wykolejeń wynikających z przeprowadzonych napraw konserwacyjnych torów,
- **modeli uszkodzeń związanych ze zmęczeniem obciążeniowym komponentów**, które można zastosować w sytuacjach związanych z kumulowaniem się naprężeń na elementach sprzętu w związku z wielkością transportowanych ładunków i długością trasy ich przewozu; modele takie są stosowane do wykolejeń w wyniku zachodzenia procesów zmęczenia komponentów systemu transportu,
- **modeli drzewa zdarzeń i drzewa błędów**, które można stosować w badaniach sekwencji zdarzeń następujących po wykolejeniu lub zderzeniu.

3.4. Schemat obliczeń prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń LOC

Prawdopodobieństwo wystąpienia utraty szczelności zbiornika zawierającego niebezpieczne substancje (tzn. wystąpienia zdarzeń LOC) może być podzielone na prawdopodobieństwo zdarzenia w wyniku kolizji (COL) i na prawdopodobieństwo w wyniku wykolejenia (DER). Schemat obliczeń prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń LOC przedstawiono na rysunku 4. W obu wypadkach prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń LOC jest równe prawdopodobieństwu wystąpienia odpowiedniego zdarzenia początkującego pomnożonemu przez prawdopodobieństwo warunkowe uwolnienia substancji niebezpiecznej.

Wystąpienie zdarzeń LOC dotyczących pewnych substancji niebezpiecznych, jest wystarczające do uwolnienia niebezpiecznego materiału do środowiska. W odniesieniu do innych materiałów niebezpiecznych potrzebna jest jeszcze dodatkowa energia do ich uwolnienia. Oznacza to, że odpowiednie prawdopodobieństwa zdarzeń wyrażają następujące zależności:

- $P\{LOC|COL, \text{dodatkowa energia do uwolnienia}\} = P\{COL\} * P\{\text{uwolnienie}|COL\};$
- $P\{LOC|DER, \text{dodatkowa energia do uwolnienia}\} = P\{DER\} * P\{\text{uwolnienie}|DER\}.$

Prawdopodobieństwo kolizji jest rozdzielone na prawdopodobieństwo kolizji ze stałym obiektem, na prawdopodobieństwo kolizji z innym pociągiem oraz na prawdopodobieństwo kolizji podczas manewrowania. Zakłada się, że wszystkie te trzy zdarzenia nie występują w tym samym czasie, a zatem całkowite prawdopodobieństwo jest sumą:

$$P\{COL\} = P\{COL|\text{stały obiekt}\} + P\{COL|\text{inny pociąg}\} + P\{COL|\text{podczas manewrowania}\}.$$

Prawdopodobieństwo wykolejenia rozdzielono na prawdopodobieństwo związane z uszkodzeniem torów, prawdopodobieństwo związane z uszkodzeniem taboru oraz na prawdopodobieństwo wykolejenia w wyniku przeprowadzanych operacji, tzn:

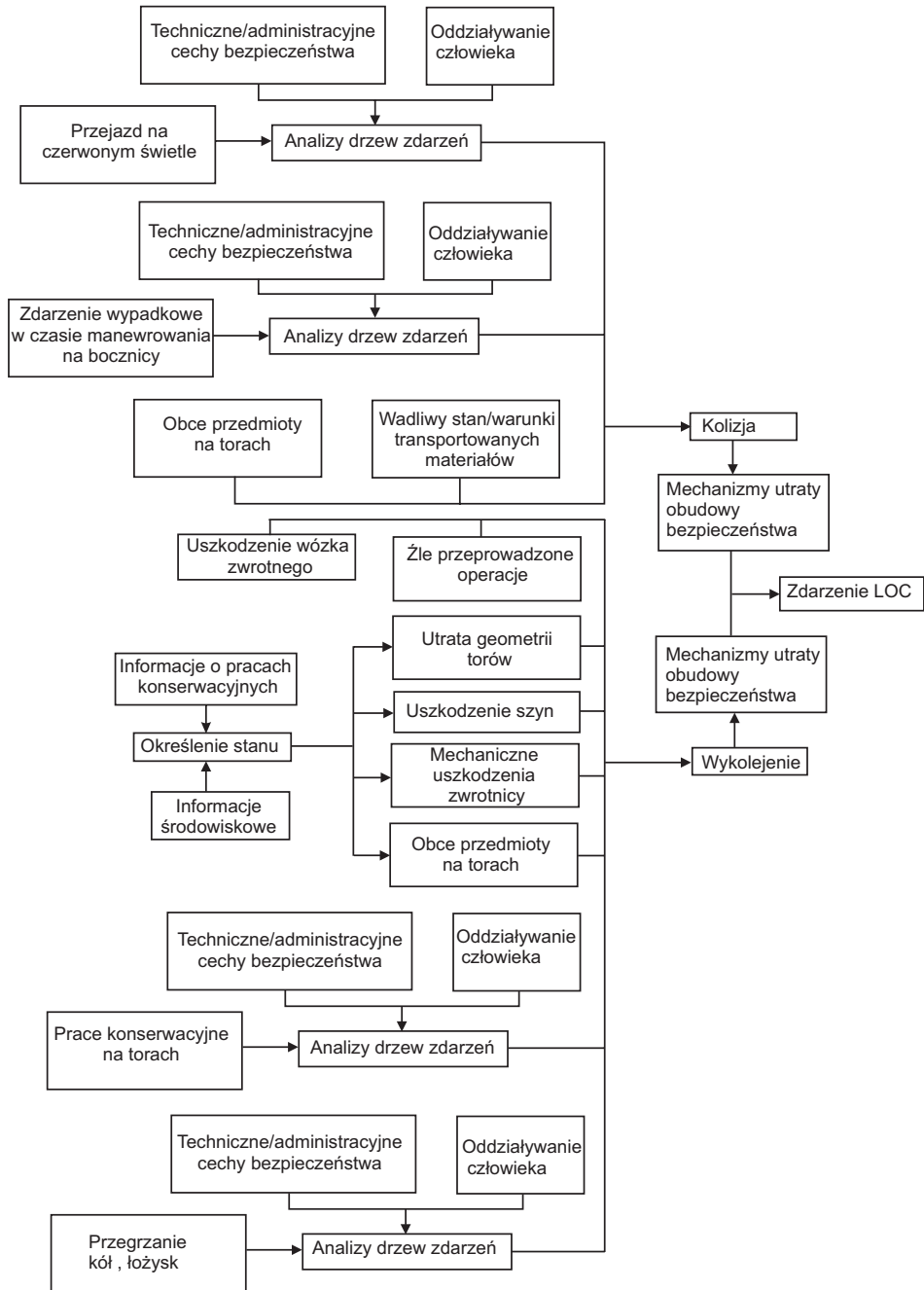
$$P\{\text{DER}\} = P\{\text{DER}|\text{uszkodzenie torów}\} + P\{\text{DER}|\text{uszkodzenie taboru}\} + P\{\text{DER}|\text{operacje}\}.$$

Prawdopodobieństwo wykolejenia związane z torami podzielono na prawdopodobieństwo wykolejenie związane ze stanem torów i na prawdopodobieństwo wykolejenia w wyniku nieodizolowania części torów poddawanej konserwacji, które może być podzielone na dwa przypadki: gdy tory są ciągle otwarte dla pociągów i gdy są one zamknięte. W obu wypadkach powinna być uwzględniona skuteczność odpowiednich środków bezpieczeństwa. Oznacza to uwzględnienie następujących zależności w obliczeniach całkowitego prawdopodobieństwa wykolejenia związanego ze stanem torów $P\{\text{DER}|\text{związane ze stanem torów}\}$.

$$P\{\text{DER}|\text{związane ze stanem torów}\} = P\{\text{DER}|\text{stan techniczny torów}\} + P\{\text{DER}|\text{tory w konserwacji zamknięte dla przejazdu pociągów}\} + P\{\text{DER}|\text{tory w konserwacji otwarte dla przejazdu pociągów}\}.$$

W obliczeniach prawdopodobieństwa wykolejenia związanego ze stanem torów uwzględnia się następujące czynniki:

- długość sekcji torów,
- rodzaj torów,
- rodzaj uformowania i podsypki,
- użyte podkłady,
- łączniki szynowe,
- rodzaj szyn,
- systemy drenażu,
- podatność na uszkodzenia przez obce przedmioty,
- systemy zabezpieczeń przed uszkodzeniami przez obce przedmioty,
- strumienie uszkodzeń komponentów systemu,
- charakterystyczne przedziały czasowe między inspekcjami lub między wystąpieniem uszkodzenia a zapoczątkowaniem naprawy, jak również czas wymagany do naprawy utraty geometrii toru, uszkodzenia szyny, uszkodzenia zwrotnicy, uszkodzenia spowodowanego upadkiem obcych przedmiotów,
- czas pomiędzy wykryciem uszkodzenia a zapoczątkowaniem naprawy,
- wartość wskaźnika związanego z odizolowaniem torów pomiędzy inspekcjami lub pomiędzy wystąpieniem uszkodzenia a zapoczątkowaniem naprawy (0 lub 1),
- wartość wskaźnika związanego z odizolowaniem torów w czasie naprawy (0 lub 1),
- prawdopodobieństwo niezaoferowania odizolowania torów po wykryciu uszkodzenia lub niezasygnalizowania dokonanego odizolowania torów przez personel wykonujący konserwacje, niepodporządkowanie się przez prowadzącego pociąg do sygnalizowanych ostrzeżeń, błędy nadzoru przy sprawdzaniu wykonanych prac.



Rys. 4. Schemat obliczeń prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń LOC (w oparciu o Gheorghie i in. 2004)

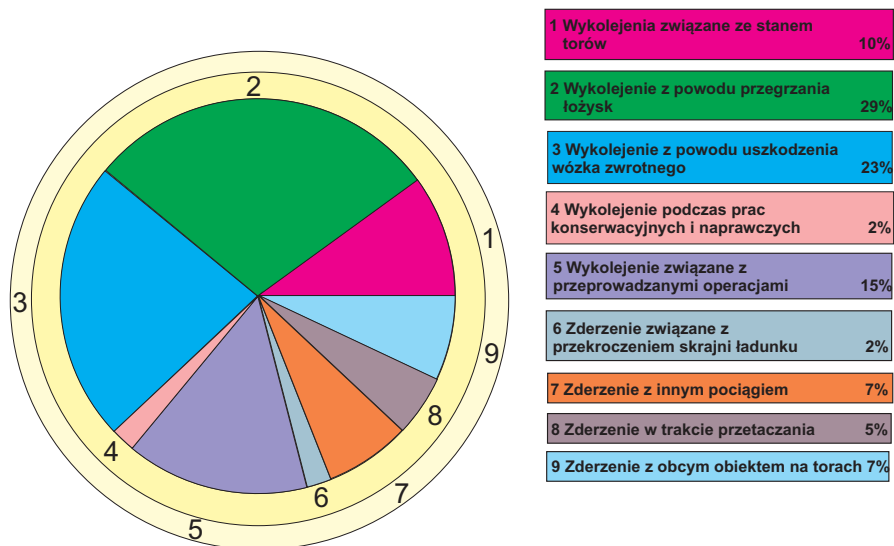
Fig. 4. Survey of the model for LOC (after Gheorghie et al. 2004)

Prawdopodobieństwo wykolejenia z powodu stanu taboru kolejowego jest podzielone na prawdopodobieństwo przegrzania łożysk i kół oraz na prawdopodobieństwo uszkodzenia wózka zwrotnego:

$$P\{\text{DER}|\text{tabor kolejowy}\} = P\{\text{DER}|\text{tabor kolejowy} - \text{przegrzanie łożysk}\} + P\{\text{DER}|\text{tabor kolejowy} - \text{uszkodzenie wózka zwrotnego}\}.$$

Zakłada się, że uszkodzenie wózka zwrotnego jest podane jako wartość oszacowana przez ekspertów. Prawdopodobieństwa wykolejenia ze względu na przeprowadzane operacje, tj. scenariusze nieuwzględnione w powyższych rozważaniach, muszą również być podane w rozpatrywanym modelu jako wartość oszacowana przez ekspertów.

Przy założeniu, że żaden z wyżej podanych scenariuszy nie wydarzy się w tym samym czasie, całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia LOC jest sumą wszystkich możliwych prawdopodobieństw wystąpienia omówionych zdarzeń. Udział możliwych scenariuszy w prawdopodobieństwie wystąpienia zdarzenia LOC wygodnie jest przedstawić w postaci diagramu, tak jak na rysunku 5.



Rys. 5. Wkład do prawdopodobieństwa wystąpienia LOC – przykład

Fig. 5. Contributions to LOC probability – an example

3.5. Obliczenia procesów fizycznych związanych z uwolnieniem

W analizach ryzyka związanych z transportem materiałów niebezpiecznych szlakami kolejowymi do obliczeń procesów fizycznych związanych z uwolnieniem takich substancji do otoczenia w wyniku rozszczelnienia zbiornika, w którym transportowane są materiały niebezpieczne można stosować takie same modele, programy obliczeniowe i bazy danych właściwości substancji niebezpiecznych, które są używane w standardowych analizach awarii przemysłowych instalacji stacjonarnych. Obejmuje to:

- obliczenie procesów uwolnienia substancji niebezpiecznej, jej transportu i dyspersji w środowisku
- oraz
- oszacowanie skutków oddziaływania na człowieka i na środowisko w związku ze skażeniem powietrza, z wysokim poziomem promieniowania cieplnego, z powstaniem fali ciśnieniowej lub z generowaniem odłamków w wyniku wybuchu.

4. PODEJŚCIE OPARTE NA KONCEPCJI GORĄCYCH PUNKTÓW

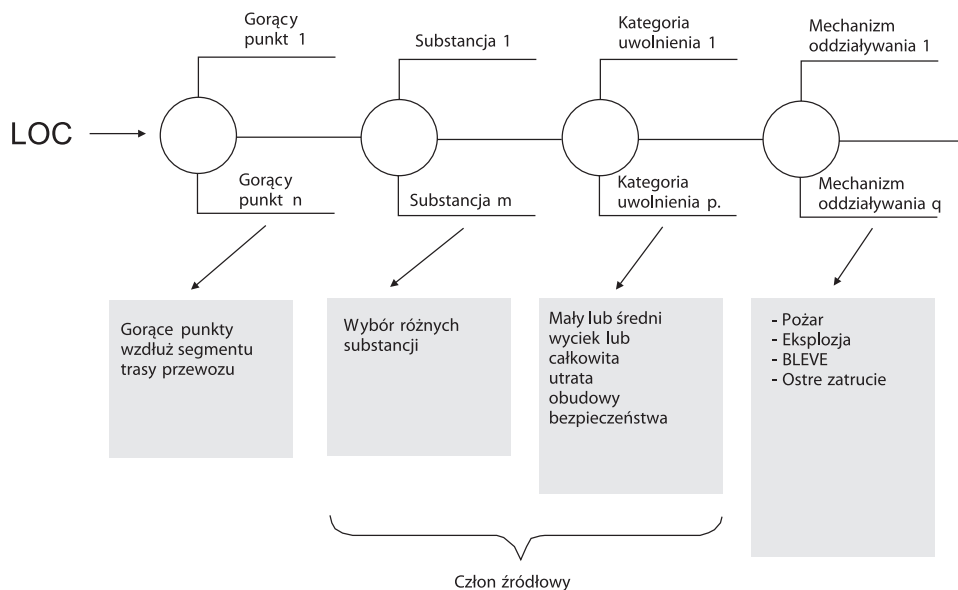
Istota podejścia. W większości analiz ryzyka związanych z transportem substancji niebezpiecznych nie są uwzględniane w odpowiedni sposób dodatkowe informacje przestrzenne, charakteryzujące analizowany system transportowy, dotyczące infrastruktury kolejowej, użytkowania terenu i gęstości zaludnienia. Proponowane podejście oparte na koncepcji gorących punktów nie ma na celu zastąpienia pełnoskalowego modelu dynamicznego, opisującego transport materiałów niebezpiecznych koleją. Jest to jedynie intuicyjne i praktyczne podejście do identyfikacji i opracowania scenariuszy, przez skoncentrowanie się na bardziej szczegółowym scharakteryzowaniu czynników determinujących zagrożenia na segmentach analizowanej drogi kolejowej. Można przy tym przyjąć, że segment to taki odcinek drogi kolejowej, na którym należy spodziewać się, że ryzyko zmienia się bardzo nieznacznie, w związku z czym, może on mieć długość kilkuset metrów. Zależy to w dużym stopniu od czynników środowiskowych, m.in. od ukształtowania terenu. Segmenty drogi kolejowej są bazą do wykreślenia krzywych CCDF.

Selekcja gorących punktów i obliczenia wystąpienia zdarzeń LOC. Gorący punkt jest zdefiniowany istnieniem przynajmniej jednego wrażliwego obiektu infrastruktury w otoczeniu miejsca o względnie dużym stopniu zaludnienia. Zwykle gorące punkty identyfikuje ekspert przeprowadzający analizę ryzyka. Takimi wyróżnionymi obiektami mogą być stacje, instalacje sygnalizacyjne, zwrotnice, mosty, przejścia/przejazdy, kanalizacja, tunele, skrzyżowania z liniami wysokiego napięcia, detektory.

Integrowanie danych. Drzewa zdarzeń używane do opracowania scenariuszy zdarzeń w fazie po uwolnieniu substancji niebezpiecznej są oparte na następujących założeniach:

- do scharakteryzowania analizowanej drogi kolejowej używane są gorące punkty;
- w opisie możliwych źródeł uwolnień każdej kategorii uwolnienia (w zakresie od małych uwolnień do pełnej utraty pojemności cysterny) i każdej substancji wprowadza się współczynniki opisujące zarówno pogorszenie zaistniałych zdarzeń jak i ich złagodzenie;
- do różnych mechanizmów oddziaływania na środowisko przypisuje się prawdopodobieństwo zajścia takich oddziaływań dla każdego mechanizmu z uwzględnieniem różnych rodzajów użytkowania terenu, przy czym można również wprowadzać czynniki pogarszające lub łagodzące zaistniałe zdarzenia.

Typową strukturę drzewa zdarzeń po wystąpieniu zdarzenia LOC przedstawiono na rysunku 6. Nie uwzględniono w tej strukturze możliwości zarządzania zdarzeniem awaryjnym. W zasadzie zbiór scenariuszy dla każdego gorącego punktu jest elementem przestrzeni trójwymiarowej we współrzędnych wyznaczonych przez kategorię uwolnienia, mechanizm oddziaływania na środowisko i ludzi oraz współrzędne przestrzenne uwolnienia. W praktyce można wygenerować tysiące scenariuszy dla względnie krótkiego odcinka drogi kolejowej.



Rys. 6. Struktura drzewa zdarzeń po wystąpieniu zdarzenia LOC

Fig. 6. Structure of the event tree after LOC

Korzyści zastosowania zaawansowanego podejścia. Korzyści zastosowania zaproponowanego powyżej zaawansowanego podejścia rozwiązania są związane:

- z integrowaniem różnego rodzaju informacji, włączając w to dane przestrzenno-środowiskowe;
- z możliwością interaktywnego zarządzania danymi;
- z możliwościami zastosowania różnych form wizualizacji wyników obliczeń w tym przedstawienia ich na mapach cyfrowych.

W odniesieniu do możliwości integracyjnych przedstawione podejście odpowiednio umożliwia odzwierciedlenie fenomenologii transportu materiałów niebezpiecznych szlakami kolejowymi przez adopcję następujących faktów (danych):

- czasu i miejsca przewozu niebezpiecznych materiałów;
- szczegółowej charakterystyki poszczególnych segmentów trasy przewozu ze względu na jej jakość techniczną w celu zapewniania usług transportowych, szczegółowego scharakteryzowania infrastruktury i stanu technicznego taboru oraz ogólnej charakterystyki działania systemu transportu;
- brania pod uwagę różnorodnych aspektów sytuacyjnych przez uwzględnienie różnych sekwencji zdarzeń prowadzących do wystąpienia zdarzeń LOC;
- możliwości zastosowania zweryfikowanych modeli obliczeń skutków dla zdrowia człowieka i środowiska.

Interaktywne zarządzanie danymi odnosi się do następujących grup danych:

- danych systemów informacji przestrzennej;
- danych fizykochemicznych substancji niebezpiecznych;
- danych statystycznych i oszacowań ekspertów (np. w celu wyznaczenia prawdopodobieństw błędów ludzkich);
- prawdopodobieństwa uszkodzeń systemów technicznych występujących w scenariuszach awaryjnych prowadzących do wystąpienia zdarzeń LOC;
- charakterystyki infrastruktury trasy przewozu z uwzględnieniem cech istotnych ze względu na możliwość wystąpienia wykolejenia i kolizji pociągów (w tym krzywizny torów, przejścia, przejazdy, zwrotnice itp.).

Szczegółowe modele obliczeniowe stosowane w ocenach ryzyka transportu kolejną materiałów niebezpiecznych zostaną zaprezentowane w drugiej części niniejszego artykułu.

ZAŁĄCZNIK A. METODY ILOŚCIOWYCH OCEN RYZYKA POWAŻNYCH AWARII

Uwagi wprowadzające

W załączniku przedstawiono podstawowe pojęcia, zakres i metody ilościowych ocen ryzyka, które mają zastosowanie w razie poważnych awarii instalacji stacjonarnych i katastrof transportowych z udziałem niebezpiecznych substancji.

Wyważona ocena bezpieczeństwa i ryzyka poważnych awarii obiektów przemysłowych, które charakteryzują wbudowane cechy bezpieczeństwa, wymaga stosowania takich metodyk predykcyjnych jak: Probabilistyczne Oceny Bezpieczeństwa, znane w terminologii angielskiej jako *Probabilistic Safety Assessment* (PSA). Metodyki te zostały po raz pierwszy opracowane na potrzeby kompleksowych analiz bezpieczeństwa instalacji jądrowych. Metodyki PSA dostarczają strukturalnego i logicznego podejścia do wyznaczania wiarygodnych, potencjalnych scenariuszy awaryjnych instalacji, ocen ich prawdopodobieństw i skutków.

W ostatnim dwudziestoleciu wypracowano odpowiednie standardy metodyk PSA. Po pewnych modyfikacjach, a także pod zmienioną nazwą: *Ilościowe Oceny Ryzyka* (QRA), metodyki PSA zostały adaptowane do analiz przemysłowych i transportowych instalacji chemicznych, platform wydobywczych na morzu i przemysłu kosmicznego. Modyfikacje i adaptacje były konieczne ze względu na fundamentalne różnice pomiędzy energetyką jądrową (gdzie mamy do czynienia w zasadzie z jednym niebezpiecznym procesem) a innymi rodzajami niebezpiecznej działalności, w szczególności w przemyśle chemicznym, gdzie może współistnieć jednocześnie lub zachodzić kolejno wiele procesów niebezpiecznych.

W analizach PSA przyjmuje się, że ryzyko R , to uporządkowana trójka:

$$R = (S, P, C),$$

gdzie:

S – scenariusz wypadku, zwykle opisany jako ciąg następujących po sobie zdarzeń,

P – prawdopodobieństwo zajścia S ,

C – odpowiednia miara skutków wywołanych przez S .

Tabela A. Zakres pełnej analizy QRA**Table A.** Full scope of Quantitative Risk Assessment-QRA

I.	Ustalenia co do przedmiotu i zakresu analiz Cele analizy ryzyka, w tym punkty końcowe analiz. Opis obiektu i zebranie informacji o obiekcie i jego otoczeniu na potrzeby analiz.
II.	Identyfikacja zagrożenia Identyfikacja źródeł zagrożeń. Identyfikacja stanów eksploatacyjnych obiektu ważnych dla ocen zagrożenia. Wybór zdarzeń początkujących ciągi awaryjne. Określenie funkcji bezpieczeństwa. Wyznaczenie związków pomiędzy funkcjami bezpieczeństwa a systemami obiektu i procedurami postępowania realizującymi te funkcje. Określenie kryteriów sukcesu wypełnienia funkcji bezpieczeństwa przez systemy obiektu i działania operatorskie. Pogrupowanie zdarzeń początkujących ze względu na kryterium wymagań systemów i działań operatorskich. Selekcja zdarzeń początkujących generujących scenariusze awaryjne dominujące ze względu na wielkość zagrożeń.
III.	Opracowanie modeli scenariuszy (ciągow) awaryjnych Opracowanie modeli funkcjonalnych i systemowych ciągów zdarzeń (drzewa zdarzeń). Opracowanie modeli do analiz niezawodności systemów występujących w definicji ciągów zdarzeń (drzewa uszkodzeń itp.). Opracowanie modeli analiz błędów ludzkich popełnianych w normalnych stanach eksploatacyjnych obiektu oraz w stanach awaryjnych. Ocena zależności pomiędzy systemami/elementami/działaniami operatorskimi: <ul style="list-style-type: none"> • generowanych przez zasady funkcjonowania obiektu, • powstałych w wyniku procesów fizycznych lub przyjętych zasad obsługi w normalnych stanach eksploatacyjnych i awaryjnych.
IV.	Przygotowanie banków danych do analiz ilościowych Ocena częstotliwości występowania zdarzeń początkujących. Opracowanie baz danych o prawdopodobieństwach uszkodzeń elementów systemów technicznych. Opracowanie (dobór) baz danych dotyczących prawdopodobieństwa błędów ludzkich. Opracowanie (dobór) banków danych fizykochemicznych związków niebezpiecznych (wybuchowość, palność, toksyczność).
V.	Analiza ilościowa ciągów zdarzeń awaryjnych – obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia tych ciągów Pogrupowanie ciągów według kryterium uszkodzenia obiektu lub charakterystyki uwolnień. Wyznaczanie prawdopodobieństw zająć ciągów awaryjnych. Określenie zdarzeń dominujących (uszkodzeń sprzętu, działań operatorskich) dla każdej grupy ciągów. Analiza błędów oceny prawdopodobieństwa ciągów awaryjnych.
VI.	Wyznaczenie kategorii uwolnień substancji niebezpiecznych Obliczenie uwolnień frakcji ciekłej i gazowej substancji niebezpiecznych. Określenie i analiza ilościowa zjawisk fizycznych towarzyszących uwolnieniom.
VII.	Oszacowanie skutków Określenie klas warunków atmosferycznych, w oparciu o dane statystyczne. Opis topografii otaczającego terenu. Oszacowanie skutków dla każdej kategorii uwolnień substancji niebezpiecznych.

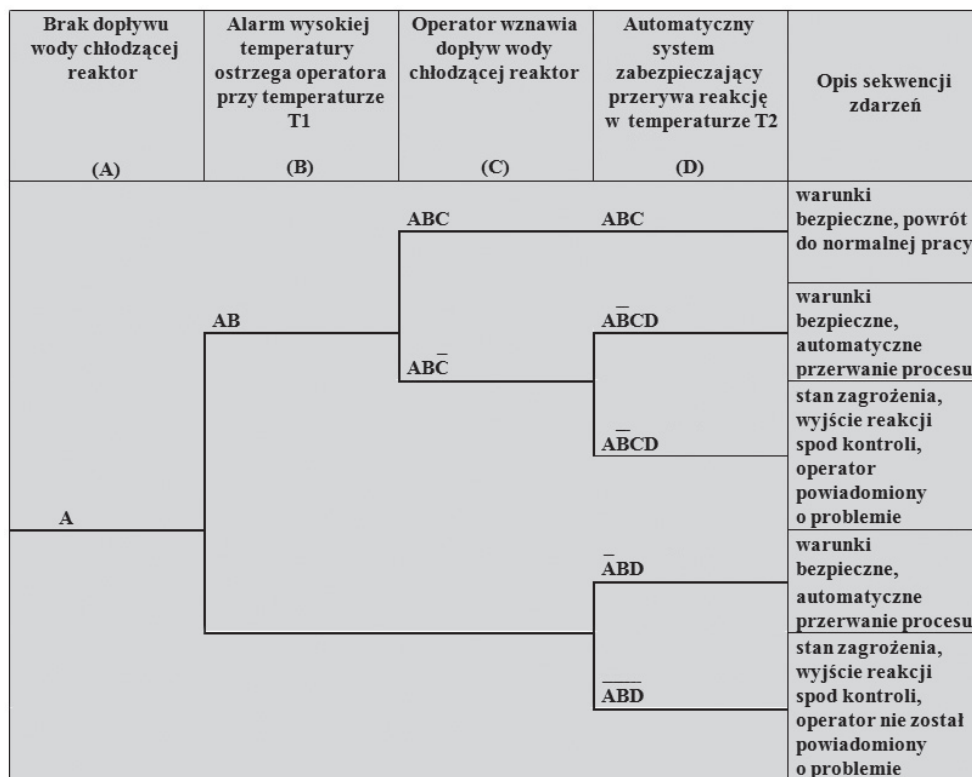
Oceny ryzyka metodami QRA umożliwiają rozważenie wszystkich elementów zarządzania ryzykiem w celu wypracowania najlepszych całościowych działań, gwarantujących, że istotne kryteria bezpieczeństwa dotyczące ryzyka są spełnione przez analizowaną instalację lub działalność. Wiąże się to z identyfikacją źródeł zagrożeń, określeniem możliwych scenariuszy awaryjnych S , oceną prawdopodobieństwa P wystąpienia takich scenariuszy i ich potencjalnych skutków C , wyznaczeniem profilu ryzyka instalacji i porównaniem z obowiązującym kryterium w tym zakresie.

Powszechnie stosowanymi technikami wyznaczania prawdopodobieństwa wystąpienia ciągów zdarzeń awaryjnych jest analiza drzew uszkodzeń i drzew zdarzeń.

Analiza Drzew Zdarzeń (Event Tree Analysis)

Analiza Drzew Zdarzeń (ETA) rozpatruje ciąg zdarzeń awaryjnych od zdarzenia początkującego do zdarzenia końcowego, ze szczególnym uwzględnieniem momentów mających decydujące znaczenie na stan obiektu (instalacji).

W wielu sytuacjach pojedyncze zdarzenie może prowadzić do wielu różnorodnych następstw, w zależności od sprawności lub niesprawności elementów/systemów/działań operatorskich przewidzianych do opanowania tego zdarzenia. Kombinacja zdarzenia początkującego i tych sprawności/niesprawności definiuje poszczególne ciągi zdarzeń awaryjnych. ETA jest podstawową metodą tworzenia probabilistycznego modelu obiektu do analiz zagrożenia. Wyróżnia się dwie formy ETA: przedwypadkową i powypadkową. Przedwypadkowa forma może służyć do ustalenia zbiorów zdarzeń początkujących i oceny prawdopodobieństwa ich zajścia. Powypadkowa natomiast do analizy zaistniałej awarii i identyfikacji niedoskonałości funkcjonalnej systemów bezpieczeństwa.



Rys. A. Drzewo zdarzeń dla zdarzenia początkującego: „brak wody chłodzącej reaktor chemiczny”

Fig. A. Event tree for the initiating event: „Loss of chemical reactor cooling water”

Procedura analiz ETA składa się z sześciu głównych etapów:

- identyfikacja zdarzenia inicjującego, które może doprowadzić do założonej awarii;
- identyfikacja funkcji bezpieczeństwa (realizowanych przez systemy techniczne instalacji oraz jej obsługę), przewidzianych do zahamowania rozwoju stanu awaryjnego oraz łagodzenia jego skutków;
- konstrukcja drzewa zdarzeń;
- identyfikacja występujących w drzewie zdarzeń ciągów awaryjnych; prowadzących do niepożądanych skutków;
- wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia ciągów awaryjnych oparte na niezawodności (głównie metodą FTA) systemów technicznych i błędy działań obsługi, wyznaczających te ciągi.

W analizach zagrożeń od instalacji chemicznych zdarzenie inicjujące jest często związane z uwolnieniami substancji niebezpiecznych. Uwolnienie to może być związane z uszkodzeniami rurociągów, zbiorników lub z eksplozjami. Funkcje bezpieczeństwa stano-

wią urządzenia, działania lub bariery przerywające ciągi zdarzeń zapoczątkowanych zdarzeniem inicjującym. Oszacowanie wystąpienia każdej sekwencji awaryjnej opiera się na wyznaczeniu prawdopodobieństwa warunkowego dla każdej funkcji bezpieczeństwa przy warunku, że zaistniało zdarzenie bezpośrednio poprzedzające. Prawdopodobieństwa dla każdej gałęzi muszą sumować się do jedności. Źródłem prawdopodobieństw warunkowych mogą być dane historyczne, dane z podobnych instalacji lub oceny ekspertów. **Dokładniejsze oszacowania daje jednak konstruowanie i analiza ilościowa drzew uszkodzeń dla każdej gałęzi drzewa zdarzeń w przypadku złożonych systemów bezpieczeństwa. Zdarzeniem szczytowym dla takiego drzewa uszkodzeń jest niewypełnienie funkcji bezpieczeństwa przez system.** Przykład zdarzeń pokazuje rysunek A.

Analiza Drzewa Uszkodzeń (Fault Tree Analysis)

Analiza Drzewa Uszkodzeń (FTA) jest jedną z częściej stosowanych metod analiz niezawodności systemów. Czasami służy ona również do identyfikacji i oceny prawdopodobieństwa zdarzeń początkujących. Polega ona na określeniu powiązań logicznych pomiędzy przyczynami – tzw. zdarzeniami elementarnymi (awarią pompy, wadliwym zadziałaniem przekaźnika, nieprawidłowym działaniem operatora) a ich skutkami – zdefiniowanymi przez analityka stanami odbiegającymi od założonej normy (niesprawnością systemu, wyciekami substancji, eksplozją, brakiem odprowadzania ciepła). FTA opiera się na danych niezawodnościowych dotyczących urządzeń mechanicznych, elektrycznych, aparatury kontrolno-pomiarowej, danych o wytrzymałości zbiorników i rur oraz innych informacji opisujących prawdopodobieństwo uszkodzenia dowolnego elementu wchodzącego w skład instalacji i wpływającego na jej funkcjonowanie. Nazwa metody jest związana z jej postacią graficzną: stan awaryjny – zdarzenie szczytowe jest połączone „gałęziami” wraz z odpowiednimi logicznymi bramkami wyboru ze zdarzeniami pośrednimi aż do poziomu zdarzeń uznanych za i elementarne. Zdarzenia elementarne nie są dalej rozwijane na składowe bardziej szczegółowe. Analiza Drzewa Uszkodzeń służy do ilościowego oszacowania prawdopodobieństwa zdarzenia szczytowego poprzez prawdopodobieństwa zdarzeń elementarnych oraz do wskazania elementów, które głównie przyczyniają się do wielkości prawdopodobieństwa zdarzenia szczytowego. Cały zakres analizy FTA polega na:

- zdefiniowaniu zdarzenia szczytowego (niesprawności systemu, zdarzenia początkującego);
- ustaleniu hierarchicznej struktury drzewa uszkodzeń (zdarzenia pośrednie);
- skonstruowaniu drzewa uszkodzeń, polegającego na powiązaniu zdarzeń logicznymi bramkami wyboru;
- określeniu zdarzeń podstawowych wiodących do zdarzenia szczytowego;
- określeniu prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń początkujących;
- wyznaczeniu „minimalnych przekrojów drzewa”, tj. minimalnych zbiorów zdarzeń ele-

- mentarnych prowadzących do zdarzenia szczytowego;
- obliczeniu prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia szczytowego;
 - analizie wyników pod kątem wyznaczenia dominujących zdarzeń elementarnych;
 - analizie czułości polegającej na sprawdzeniu jak zmiana prawdopodobieństwa uszkodzenia jednego elementu ze zbioru przekrojów minimalnych wpływa na prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia szczytowego.

Uszeregowana lista przekrojów minimalnych drzewa prowadzących w danych warunkach do zdarzenia szczytowego jest szczególnym wynikiem jakościowych analiz metodą FTA. Model drzewa uszkodzeń jest często stosowany jako efektywne narzędzie porozumiewania kadry technicznej i decyzyjnej w sprawach wymaganej sprawności badanego systemu technicznego i bezpieczeństwa całej instalacji obejmującej wiele systemów. Opierając się na liczbie i typie uszkodzeń w przekrojach minimalnych zespół analityków może zaproponować udoskonalenia systemu zmniejszające prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia szczytowego – zwiększającego jego niezawodność.

PIŚMIENNICTWO

- Advisory Committee on Dangerous Substances. Major hazard aspects on the transport of dangerous substances.** 1988. Health and Safety Commission, London.
- A national risk assessment for selected hazardous materials in transportation.** 2000. ANL/DIS-01-1. Argonne National Laboratory.
- BORYSIEWICZ M. 2006. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z krajami sąsiednimi – międzynarodowy transport substancji niebezpiecznych – I etap z RFN. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Warszawa.
- BORYSIEWICZ M. 2007a. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z Rosją – międzynarodowy transport niebezpiecznych substancji chemicznych. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, grudzień 2007 r. Warszawa.
- BORYSIEWICZ M. 2007b. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z Białorusią. Międzynarodowy transport niebezpiecznych substancji chemicznych. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony, grudzień 2007 r. Warszawa.
- BORYSIEWICZ M. 2008a. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z Czechami – międzynarodowy transport niebezpiecznych substancji chemicznych. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, listopad 2008 r. Warszawa.
- BORYSIEWICZ M. 2008b. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z Litwą – międzynarodowy transport niebezpiecznych substancji chemicz-

- ných. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, listopad 2008 r. Warszawa.
- BORYSIEWICZ M. 2008c. Analiza zagrożeń poważnymi awariami w obszarach przygranicznych z Ukrainą – międzynarodowy transport niebezpiecznych substancji chemicznych. Raport wykonany dla Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, listopad 2008 r. Warszawa.
- COZZANI V., SPADONI G., GIUSTI S., ZANELLI S. 2004. The use of HazOp and fault tree techniques for the assessment of non-accident induced release frequencies in the transport of hazardous substances. PSAM7-ESREL'04 proceedings of the seventh international conference on probabilistic safety assessment and management. Springer, Berlin.
- GHEORGHE A.V., BIRCHMEIER J., VAMANU D., PAPAZOGLU I., KRÖGER W. 2004. Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support. Reliability Engineering and System Safety 88 (2005): 247–272.
- Handbuch III zur Storfalverordnung StfV, Richtlinien für Verkehrswege.** 1992. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL). Bern.
- KRÖGER W., HØJ N.P. 2001. Risk analysis of transportation of road and railway from a European perspective. Safety Science.
- Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in the process and related industries.** International Atomic Energy Agency (IAEA). 1996. IAEA-TECDOC 727, Rev. 1. Vienna.
- MASCHIO G., MILAZZO M.F., ANTONIONI G., SPADONI G. 2004. Quantitative transport risk analysis on a regional scale: application of TRAT-GIS to East Sicily. PSAM7-ESREL'04 proceedings of the seventh international conference on probabilistic safety assessment and management. Springer, Berlin.
- Monografia „Models and Techniques for Health and Environmental Hazards Assessment and Management”.** 2006. ISBN 83-914809-7-6. SUPPLEMENT Transportation Risk Assessment, M.J. Borysiewicz. Instytut Energii Atomowej.
- Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter.** 1998. Fallbeispiel Bahn. Zollikon: Ernst Basler & Partner.
- Quantitative risk assessment for transportation of hazardous materials, road-rail-water-pipeline, risk calculation methodology, background document.** AVIV BV Consultants. The Hague: Ministry of Transport. 1999.
- SACCOMANNO F.F., CASSIDY K. (editors) 1993. Transportation of dangerous goods: assessing the risks. Ont: Institute for Risk Research, Waterloo.