

Monitorowanie jako element bezpieczeństwa przewozów towarów niebezpiecznych – koncepcja systemu

**Sylwia Bęczkowska,
Iwona Grabarek**

Politechnika Warszawska
Wydział Transportu

Abstrakt: Przewóz towarów transportem drogowym utrzymuje się wciąż na wysokim poziomie. Zjawisko to poza pozytywnymi aspektami dla gospodarki niesie ze sobą również negatywne i kosztowne skutki, szczególnie w zakresie przewozu ładunków niebezpiecznych. Towary te, ze względu na swój charakter, stwarzają duże zagrożenie dla środowiska naturalnego oraz ludzi. Zasady nadzoru transportu tych towarów są regulowane przez właściwe dokumenty normatywne i wytyczne zatwierdzone w Unii Europejskiej i w Polsce. Pomimo zastrzonych środków bezpieczeństwa bardzo często dochodzi do zdarzeń niepożądanych o negatywnych skutkach społecznych, środowiskowych i finansowych. Stan ten wymusza podejmowanie działań mających na celu minimalizację ryzyka przewozu i zwiększenie jego bezpieczeństwa. Jednym z takich działań jest wprowadzenie monitorowania ładunku od odbiorcy do nadawcy. Na rynku dostępne są systemy monitorowania pojazdów, które wykorzystują systemy nawigacji satelitarnej. Ich celem jest m.in. określenie lokalizacji pojazdów, kontrola paliwa czy zabezpieczenie pojazdów przed kradzieżą. Niestety, nie zapewniają one zintegrowanego monitorowania, uwzględniającego wieloaspektowość zagadnienia, a przede wszystkim wpływu stanu psychofizycznego kierowcy na wartość ryzyka, jak również skutków działań terrorystycznych, które w obecnych czasach nabrały istotnego znaczenia. W artykule przedstawiono koncepcję zintegrowanego systemu, uwzględniającego aktualny stan rozwiązań w tym zakresie. Przesłanki budowy systemu, zasady jego funkcjonowania, przepływ informacji pomiędzy uczestnikami oraz rolę czynnika ludzkiego w systemie, a także korzyści płynące z jego implementacji omówiono na przykładzie przewozu LNG. Zwrócono też uwagę na skutki społeczno-ekonomiczne funkcjonowania systemu jako elementu niezbędnego do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa w przewozie towarów o właściwościach szczególnie niebezpiecznych.

Słowa kluczowe: transport towarów niebezpiecznych, monitorowanie, bezpieczeństwo, czynnik ludzki

Korespondencja:
Sylwia Bęczkowska
Politechnika Warszawska
Wydział Transportu
Zakład Podstaw Budowy
Urządzeń Transportowych
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa, Poland
Tel. +48 22 234 73 37
E-mail: bes@wt.pw.edu.pl

1. Wprowadzenie

Przewóz towarów niebezpiecznych w Polsce od wielu lat odbywa się głównie transportem drogowym. Jak szacuje Najwyższa Izba Kontroli, wielkość przewozu towarów tego typu transportem drogowym kształtuje się u nas w granicach 10–15%

całości przewozów według liczby ton. W 2012 roku liczba ta wyniosła 1551,8 mln ton, w tym ładunki niebezpieczne mogły stanowić około 150 mln ton. Większość z nich, ponad 70%, to paliwa ciekłe, transportowane w cysternach. Według prognoz NIK wolumen przewozów ładunków niebezpiecznych w Polsce podwoi się w ciągu najbliższych 5–10 lat (NIK, 2012).

Istotną przewagą transportu drogowego w porównaniu z innymi jego rodzajami wynika między innymi z: bezpośredniości i szybkości przewozów, dużej dostępności środków transportowych oraz relatywnie niskiej ceny w porównaniu na przykład z transportem kolejowym (Antonowicz, Syryjczyk, Faryna [red.], 2015). Fakt ten jednak spowodował wzrost zagrożenia dla ludzi oraz środowiska naturalnego. W sytuacji przewozu towarów szczególnie niebezpiecznych, podlegających pod międzynarodową umowę ADR (fr. *L'Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*) należy rygorystycznie przestrzegać wszystkich procedur, ponieważ skutki ewentualnego wypadku mogą być znaczące. Biorąc pod uwagę dane statystyczne Unii Europejskiej dotyczące wypadków ogółem, okazuje się, że najwyższy wskaźnik zabitych w UE w 2012 roku odnotowano dla Polski, tzn. 11 zabitych na 100 wypadków drogowych. Pomimo utrzymania w 2015 roku przez Polskę trendu spadkowego w tym zakresie, liczba ofiar śmiertelnych nadal należy do jednej z najwyższych w Europie i daleko odbiega od średniego poziomu (Statystyki UE, 2017). A zatem polskie drogi są najbardziej niebezpieczne spośród dróg UE. W transporcie towarów niebezpiecznych w Polsce odnotowuje się kilkaset wypadków rocznie, ale w porównaniu z liczbą wypadków z udziałem innych użytkowników dróg, na przykład samochodów osobowych, jest to liczba relatywnie mała. Problem jednak tkwi nie w liczebności, lecz w rozmiarze skutków.

Poszukując przyczyn wypadków drogowych z udziałem towarów niebezpiecznych, należy przyjąć, że do wypadku dochodzi na skutek odchylenia od normy jednego bądź wielu elementów, takich jak: człowiek, pojazd, droga czy organizacja ruchu. Podstawowym i najważniejszym elementem w systemie kierowca–pojazd–otoczenie jest oczywiście kierowca. Do większości wypadków drogowych w przypadku kierowców zawodowych (około 58%), jak podają statystyki policyjne, dochodzi w nocy, na prostych odcinkach dróg (KGP, 2014). Wyniki wielu badań wskazują, że senność i obniżenie czujności mają bezpośredni związek z długością czasu trwania pracy, a narastające zmęczenie, zwłaszcza przy wydłużonym czasie pracy, wpływa niekorzystnie na jakość i bezpieczeństwo jazdy (Bęczkowska, Grabarek, 2011; Bęczkowska, Grabarek, 2012a; Bęczkowska, Grabarek, 2012b; Matthews, Desmond, Neubauer, Hancock [eds.], 2012; Jamroz, Smolarek, 2012; Jamroz, Smolarek, 2013). Te i wiele innych czynników, między innymi stres, mikroklimat, warunki wibroakustyczne, monotonia jazdy, presja czasu czy nadmierne obciążenie informacjami, oddziałuje na kierowcę, obniżając jego sprawność i zwiększając prawdopodobieństwo popełnienia przez niego błędów.

Drugim elementem będącym przyczyną wypadków w przewozie towarów chemicznych, biologicznych lub promieniotwórczych jest stan techniczny pojazdów i zbiorników. Ponadto należy zwrócić uwagę na brak w Polsce parkingów dla pojazdów z towarami niebezpiecznymi, przystosowanych do wymagań UE. Niewątpliwie efektywny i bezpieczny wypoczynek kierowcy zależy od jakości i dostępności miejsc parkingowych i w rezultacie skutkuje jego zwiększoną sprawnością (Kopczewski, Nowacki, Krysiuk, 2016). Zgodnie z wymaganiami UE parkingi powinny należeć do jednej z pięciu kategorii (Kopczewski, Nowacki, Krysiuk, 2016), od najniższego poziomu bezpieczeństwa (kategoria 1) do najwyższego po-

ziomu bezpieczeństwa (kategoria 5). W dobie dzisiejszego rozwoju technologii, a co za tym idzie – rozwoju metod, jakich używają terroryści, brak odpowiedniej infrastruktury może przyczynić się do nieświadomego wykorzystania kierowcy i cysterny w organizowanym ataku (Bęczkowska, 2014; Kopczewski, Nowacki, Krysiuk, 2016).

Zwiększenie bezpieczeństwa w transporcie towarów niebezpiecznych wymaga podejmowania różnorodnych działań, do których można zaliczyć również monitorowanie towarów niebezpiecznych. Obecnie w Polsce nie ma ogólnokrajowego, zintegrowanego systemu, który wspierałby działania każdej zainteresowanej strony – instytucji państwowych zajmujących się bezpieczeństwem oraz samych firm dostarczających określone produkty. Podejmowane ustawowo działania nie mają na celu zwiększenia w bezpośredni sposób bezpieczeństwa przewozu. Obowiązująca od 1 maja 2017 roku Ustawa o systemie monitorowania drogowego przewozu towarów (Dz.U. z 2017 r., poz. 708) dotyczy określenia zasad przewozu towarów, zwłaszcza tych, w stosunku do których stwierdzono nieprawidłowości w rozliczeniach z tytułu podatku od towarów i usług lub podatku akcyzowego (uszczerpkienia podatkowe) oraz określenia odpowiedzialności za naruszenie obowiązków związanych z drogowym przewozem towarów podmiotu wysyłającego, podmiotu odbierającego, przewoźnika, kierującego środkiem transportu. Dotyczy ona między innymi przewozu takich towarów niebezpiecznych, jak: paliwa płynne, biodiesle, alkohol etylowy czy odpady niebezpieczne. Monitoring będzie zorganizowany w systemie teleinformatycznym prowadzonym przez Szefa Krajowej Administracji Skarbowej.

Głównym zadaniem wdrożonego obligatoryjnie systemu monitoringu jest śledzenie przewozu określonej grupy towarów, obserwowanie trendów, szacowanie prognoz w przewozach wybranych towarów niebezpiecznych oraz czerpanie korzyści materialnych przez właściwe władze. Zakładając zainteresowanie decydentów, można by ustawowo wprowadzony system uzupełnić o element nadzorujący bezpieczeństwo przewozu, dzięki czemu jego funkcjonalność nabrałaby nie tylko fiskalnego znaczenia. Zaproponowana i przedstawiona w niniejszym artykule koncepcja systemu monitorowania dotyczy przewozu gazu ziemnego LNG, czyli towaru niebezpiecznego klasy drugiej.

2. Przegląd systemów monitorowania pojazdów

Dynamiczny rozwój sieci drogowej w Polsce spowodował zwiększenie popytu wśród firm transportowych, również tych z branży towarów niebezpiecznych, na systemy wykorzystujące nawigację satelitarną. Ich zadaniem jest między innymi określenie lokalizacji pojazdu, która może być zaprezentowana w formie tekstowej lub graficznej, określenie prędkości pojazdu, kierunku i czasu jazdy, postoju, a także przebytej drogi, historia eksploatacji pojazdu, ochrona pojazdu, zwiększenie bezpieczeństwa dostaw poprzez identyfikację danych pojazdu, jego numerów rejestracyjnych, ograniczenie możliwości pogorszenia jakości produktu, kontrola paliwa czy zabezpieczenie pojazdów przed kradzieżą. Do najbardziej znanych systemów można zaliczyć: Automonitoring, ELTE GSM, SpaceGuard, Mobitel, Cityloc bądź FDMS (ang. *Fuel Delivery Monitoring System*). Ponadto wielu producentów pojazdów zapewnia fabryczne wyposażenie w moduły nawigacyjne, które uwzględniają wybór tras alternatywnych, z pominięciem korków, utrudnień drogowych czy wymagań dla pojazdów z towarami niebezpiecznymi.

Wymienione systemy wykorzystują do lokalizacji GPS (*Global Positioning System*), lecz nie zapewniają zintegrowanego monitorowania i zarządzania środkami transportu, które jest niezbędne przy przewozie towarów niebezpiecznych. Dostępność pojedynczych czujników pomiarowych oferowanych na rynku, możliwość wykorzystania GSM (*Global System for Mobile Communications*) lub GPS do lokalizacji środka transportu, może być efektywna pod warunkiem zintegrowania wszystkich modułów w jednolity system informatyczny. Obecnie zapewnienie łączności mobilnej to jeden z elementów bezpieczeństwa współczesnego transportu. Dostęp do danych w czasie rzeczywistym pozwala zarządzać ładunkiem oraz może ograniczyć prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku i ewentualne straty z nim związane. Pełne monitorowanie i zarządzanie transportem powinno zapewniać nie tylko bezpieczeństwo przewożonego ładunku, ale również, a może przede wszystkim, bezpieczeństwo kierowcy i otoczenia, w którym transport się odbywa. Narażenie kierowcy na wiele różnorodnych czynników związanych z charakterem ładunku, organizacją przewozu, warunkami drogowymi, a ostatnio także na ataki terrorystyczne, generuje dodatkowy stres i zwiększa prawdopodobieństwo spowodowania przez niego wypadku.

Badania dotyczące modelowania wpływu czynnika ludzkiego na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku w transporcie towarów niebezpiecznych były realizowane na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, a ich wyniki zostały uwzględnione w koncepcji budowy systemu monitorowania. W początkowym etapie tworzenia systemu ograniczono się do monitorowania przewozu jednej z trzynastu klas towarów niebezpiecznych, gazu ziemnego LNG, drugiej co do wielkości przewożonej klasy towarów niebezpiecznych (Statystyki UE, 2017). Kolejnym powodem wyboru gazu LNG jest niedawno otwarty w Świnoujściu, nowoczesny terminal LNG, który poza dystrybucją gazu rurociągami ma trzy stanowiska do tankowania cystern drogowych w celu transportowania go w postaci ciekłej (Materiały informacyjne Gaz System, 2017). Ponadto gaz ziemny jest po ropie naftowej drugim co do wielkości zużycia światowym paliwem. Dane dotyczące gospodarki światowej prognozują wzrost jego zużycia. W Polsce transport drogowy gazu ziemnego dopiero jest wprowadzany, a liczba cystern drogowych oscyluje w granicach 30–40 i niestety jest podzielona między kilka firm przewozowych (Raport badań stateczności bocznej cystern Transportowego Dozoru Technicznego, 2017). Jednak prognozy dynamicznego wzrostu zużycia LNG w kolejnych latach w Polsce potwierdzają konieczność podjęcia działań mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa ich przewozu.

3. Koncepcja zintegrowanego systemu monitorowania przewozu LNG transportem drogowym

Monitorowanie, jak wspomniano, to narzędzie wykorzystywane w różnym celu, na przykład do ochrony ładunku, obserwacji jego stanu, warunków przewozu czy składowania oraz położenia pojazdu. Proces monitorowania może być ciągły lub dyskretny, a jego zadaniem jest zdobycie informacji o ładunku. Tak rozumiany monitoring stanowi niezwykle szeroki obszar rozważań. System monitorowania opiera się na złożonym systemie informatycznym, wykorzystującym i przetwarzającym dane pozyskiwane z sieci czujników i nawigacji.

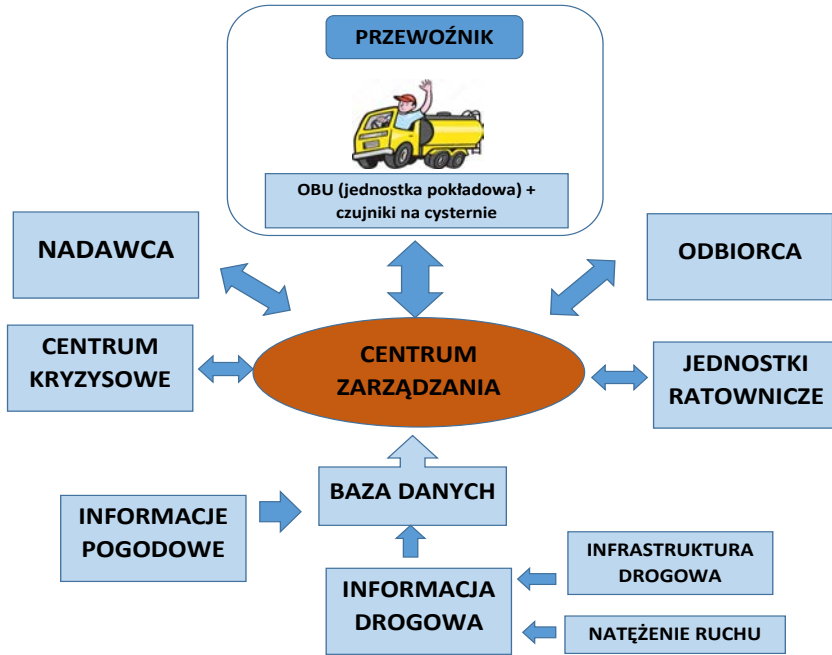
3.1. Uwarunkowania geograficzne i społeczne

Oddanie do eksploatacji nowego terminalu gazu skroplonego LNG w Świnoujściu daje duże możliwości rozwojowe w kraju, jednakże w relacji transportu drogowego *door to door* nie można pominąć kwestii bezpieczeństwa. Celem proponowanego systemu jest integracja niezbędnych informacji zarówno dla zwiększenia efektywności, jak i, a może przede wszystkim, zwiększenia bezpieczeństwa transportu LNG cysternami samochodowymi, czyli ograniczenia wszelkiego rodzaju zagrożeń w trakcie przewozu. Wymaga to monitorowania ładunku od odbiorcy do nadawcy. Warto podkreślić, że Terminal LNG w Świnoujściu znajduje się w pobliżu miejscowości turystycznych, położony jest na wyspie i istnieje tylko jedna droga dojazdowa wykorzystywana przez cysterny. Przewidywany wzrost liczby cystern przewożących gaz wygeneruje problem wąskiego gardła na tej drodze, a zatem działania prowadzące do poprawy organizacji ruchu cystern w otoczeniu Terminalu LNG mogą ten problem ograniczyć. Ponadto wzmógłony ruch cystern wywołuje niezadowolenie wśród mieszkańców, a także obawę przed potencjalnym zagrożeniem. Ów problem ma na uwadze również dystrybutor, który w deklaracji polityki firmy podkreśla konieczność działań na rzecz bezpieczeństwa pracy, środowiska i okolicznego społeczeństwa, w efekcie mających też wpływ na wizerunek firmy. Deklaracje te nabrałyby jeszcze większego znaczenia, gdyby zaproponowano systemowe rozwiązania co do bezpieczeństwa przewozu LNG transportem drogowym.

4. Zasady funkcjonowania systemu

Głównych interesariuszy systemu przedstawiono na rysunku 1. Najważniejszym elementem systemu jest kierowca-operator należący do firmy przewozowej. Jako najsłabsze ogniwo o największym zakresie obowiązków, powinien mieć zagwarantowane bezpieczeństwo poprzez zapewnienie między innymi odpowiednio dobranej trasy o najmniejszym ryzyku, właściwego miejsca postoju, ergonomicznych warunków pracy czy ochrony przed potencjalnym atakiem terrorystycznym. Pozostali interesariusze systemu to nadawca towaru, służby ratownicze, centrum kryzysowe oraz odbiorcy towaru. Komentarza wymaga nadrzędny element systemu, jakim jest centrum zarządzania, gdzie następuje analiza pozyskiwanych *on-line* informacji i na ich podstawie – podejmowanie decyzji. Jest to organ odpowiedzialny za bezpieczeństwo w przewozie LNG od nadawcy do odbiorcy. Ze względu na dużą odpowiedzialność związaną z procesem decyzyjnym trudno jest przypisać tę komórkę określonej instytucji.

Położenie każdego pojazdu zarejestrowanego w systemie będzie indywidualnie monitorowane na podstawie systemu nawigacji satelitarnej GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) z wykorzystaniem zmodyfikowanej wersji urządzeń opracowanych według powszechnie dostępnych rozwiązań komercyjnych. W tym celu każdy z pojazdów będzie wyposażony w urządzenie OBU (ang. *On-Board Unit*), które dodatkowo pozwoli kierowcy zgłaszać różnego rodzaju zagrożenia. Przy użyciu panelu dotykowego kierowca będzie mógł zgłosić: awarię techniczną pojazdu uniemożliwiającą dalszą jazdę, zagrożenie bezpieczeństwa przewożonego ładunku (wszelkie zagrożenia natury technicznej, które nie będą wykryte samoczynnie przez urządzenie OBU), alarm – w przypadku nagłego zagrożenia, na przykład atakiem terrorystycznym, porwaniem pojazdu itp. Panel OBU w postaci ekranu dotykowego ponadto umożliwi łatwą zmianę (przeprogramowanie) urządzenia, wprowadzenie modyfi-



Rysunek 1. Struktura systemu monitorowania transportu LNG
(Figure 1. Structure of LNG transport monitoring system)

Źródło: opracowanie własne.

kacji i nowych funkcji, w tym dodawanie/usuwanie wirtualnych przycisków do obsługi poszczególnych funkcji (system otwarty). Urządzenie OBU będzie połączone z modulem do monitorowania parametrów przewożonego ładunku, takich jak temperatura, ciśnienie, poziom płynu w zbiorniku itp. Odczyt parametrów będzie możliwy dzięki zainstalowaniu na jednostkach transportowych, jakimi są cysterny, czujników cyfrowych. Czujniki będą na bieżąco podawały wybrane parametry. Dostęp do danych będzie miał kierowca, jak również centrum zarządzania oraz zainteresowane strony, jeśli wyrażą taką potrzebę. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych norm parametrów sygnał alarmowy wysyłany będzie jednocześnie do kierowcy, jednostek ratowniczych (KCK), a także centrum zarządzania. W zależności od lokalizacji pojazdu informacja ta może być też przekazana do Terminalu LNG. Na podstawie modeli zagrożeń i bieżących informacji o pojazdach, zgłoszonych zagrożeniach i aktualnych warunkach atmosferycznych (temperatura, siła i kierunek wiatru, wilgotność powietrza) będzie budowana dynamiczna mapa zagrożeń i nastąpi wybór predefiniowanych scenariuszy postępowania w tych przypadkach, jak również sugerowanie trasy przewozu dla kierowcy. Informacje te będą przekazywane kierowcom wprost z centrum zarządzania. W sytuacjach krytycznych zostaną powiadomione odpowiednie służby ratunkowe. Z punktu widzenia bezpieczeństwa transportu sugerowana trasa powinna być obciążona najmniejszym ryzykiem. W ocenie ryzyka należy zatem uwzględnić szereg czynników kształtujących prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku.

5. Metoda wyboru trasy opartej na ocenie ryzyka z uwzględnieniem czynnika ludzkiego

Opracowany model oceny ryzyka, omówiony szczegółowo w publikacjach (Bęczkowska, 2014; Bęczkowska, Grabarek, Choromański, 2013), uwzględnia sugerowane wcześniej czynniki. W jego budowie założono, że na wartość ryzyka mają wpływ trzy podstawowe elementy: człowiek, droga i środek transportu. Pojęcie „droga” scharakteryzowane jest różnymi parametrami: rodzajem drogi, dopuszczalną prędkością jazdy, jej długością, obszarem, przez który przebiega, oraz występującym natężeniem ruchu. Charakterystyka człowieka/kierowcy bierze pod uwagę jego wybrane indywidualne cechy, jak również parametry i organizację pracy. Środek techniczny, jakim jest pojazd – cysterna naczepa, analizowany jest przede wszystkim z punktu widzenia stanu technicznego.

Wyznaczenie optymalnej trasy przewozu w kontekście minimalizacji ryzyka, a tym samym minimalizacji strat ludzkich, ekologicznych i finansowych, wymaga określenia ryzyka zgodnie ze wzorem (1) (Martorell, Soares, Barnett, 2014):

$$R = p_w \cdot S \quad (1)$$

gdzie:

R – wartość ryzyka;

p_w – prawdopodobieństwo wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych;

S – miara wartości strat.

Ze względu na zmienne parametry dróg i otoczenia, w jakim przebiegają, całkowitą drogę przewozu podzielono na odcinki, które scharakteryzowano szeregiem parametrów (Bęczkowska, 2014; Bęczkowska, Grabarek, Choromański, 2013) i dla każdego z nich określono ryzyko cząstkowe. Wartość ryzyka dla danego odcinka obliczono ze wzoru (2):

$$ER_q = p_{wq} \cdot ES_q \quad (2)$$

gdzie:

ER_q – oczekiwana wartość ryzyka dla q -tego odcinka trasy;

p_{wq} – prawdopodobieństwo wypadku na q -tym odcinku trasy;

ES_q – miara oczekiwanej wartości strat na q -tym odcinku trasy.

Zatem ryzyko globalne dla całej trasy określane jest zgodnie ze wzorem (3):

$$ER = \sum_{q=1}^Q ER_q \quad (3)$$

gdzie:

ER – wartość oczekiwana ryzyka globalnego na trasie przewozu;

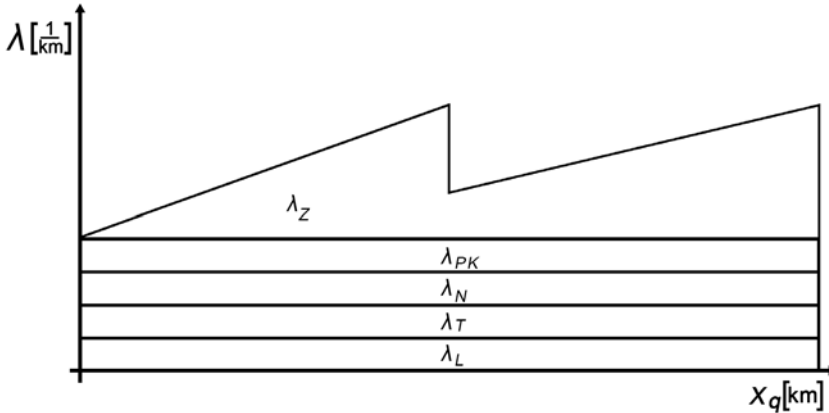
Q – zbiór odcinków tworzących trasę;

ER_q – ryzyko cząstkowe oszacowane dla q -tego odcinka trasy.

W ocenie ryzyka założono cztery scenariusze, które mogą zajść z określonym prawdopodobieństwem w wyniku wystąpienia wypadku, natomiast dla danego odcinka q i każdego scenariusza zdefiniowano straty, które odpowiadają pięciu kategoriom w zależności od rodzaju zagrożenia. Dla odcinków o różnych parametrach drogi wartości zmiennej losowej

strat przy różnych scenariuszach będą różne. Zagadnienia te opisano w pracy (Bęczkowska, 2014). W tym przypadku skupiono się na określeniu prawdopodobieństwa wypadku.

Do obliczenia prawdopodobieństwa wypadku zastosowano model pasmowy (Bęczkowska, 2014; Bęczkowska, Grabarek, Choromański, 2013), zdefiniowany za pomocą intensywności (rysunek 2).



Rysunek 2. Model pasmowy oceny ryzyka
(Figure 2. Band model of risk assessment)

Źródło: opracowanie własne.

Przyjęto, że pojęcie intensywności wystąpienia wypadku oraz gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku, dla odcinków trasy małych w porównaniu z całkowitą liczbą kilometrów przejechaną przez samochód w ciągu jego eksploatacji, mają te same wartości, a zatem pojęcia te w pracy są utożsamiane. Intensywność tę zdefiniowano zgodnie z poniższą zależnością (Szopa, 2016):

$$\lambda_q = \frac{P(x_q)}{x_q} \quad (4)$$

gdzie:

λ_q – intensywność wystąpienia wypadku na q -tym odcinku drogi;

$P(x_q)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku na q -tym odcinku drogi;

x_q – q -ty odcinek drogi.

Wprowadzony parametr intensywności wyraża wpływ czynnika ludzkiego, technicznego, środowiskowego na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku, opisanego wzorem (5):

$$P_{wq} = \begin{cases} \int_0^{x_{mn}} (\lambda_L + \lambda_T + \lambda_N + \lambda_{PK} + \lambda_Z(x)) dx \\ 1, \text{ gdy } \int_0^{x_{mn}} (\lambda_L + \lambda_T + \lambda_N + \lambda_{PK} + \lambda_Z(x)) dx > 1 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

P_{wq} – prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku na q -tym odcinku trasy;

λ_L – intensywność wystąpienia wypadku w wyniku popełnienia błędu przez kierowcę;

λ_Z – intensywność wystąpienia wypadku na skutek zmęczenia kierowcy;

λ_T – intensywność wystąpienia wypadku na skutek czynnika technicznego;

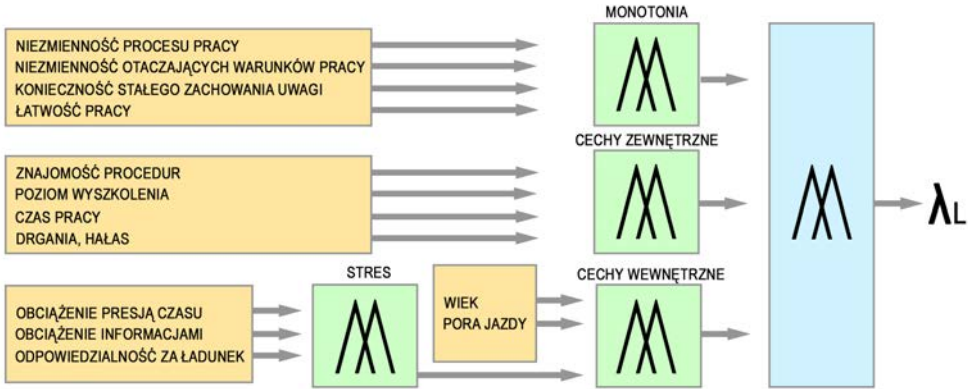
λ_{NK} – intensywność wystąpienia wypadku spowodowanego przez warunki niezależne od kierowcy, czyli zależne od innych użytkowników dróg;

λ_{PK} – intensywność wystąpienia wypadku w pobliżu baz paliwowych.

W artykule uwagę skupiono głównie na metodyce szacowania intensywności λ_L . Jako narzędzie badawcze wybrano zbiory rozmyte Mamdaniego, za pomocą których można opisać działania człowieka, na przykład kierowcy, stosując opis słowny, opracowany na podstawie wiedzy eksperta. W kolejnych krokach model można poddać procesom dostrajania w celu doprecyzowania uzyskanej wiedzy. Przydatność zbiorów rozmytych podkreśla także literatura światowa (Evans, Karwowski, 1986; Mamdani, Gaines [eds.], 1981; Yager, Filev, 1995). Przyjęto, że czynnik ludzki (z wyłączeniem jego zmęczenia) należy opisać za pomocą:

- a) cech zewnętrznych – kształtowanych przez warunki organizacyjne i techniczne: czas pracy, poziom wykształcenia, drgania, hałas, znajomość procedur;
- b) cech wewnętrznych o charakterze psychologicznym i fizjologicznym: stres, wiek, pora jazdy, monotonia.

Cechy te zostały wygenerowane przez ekspertów w przeprowadzonych autorskich badaniach ankietowych (Bęczkowska, 2014). Kolejno cechom tym przypisano wartości lingwistyczne, tzn. odpowiednio: monotonia (mała, średnia, duża), znajomość procedur (dobra, zła), poziom wykształcenia (mały, duży), czas pracy (normatywny, ponadnormatywny), warunki wibroakustyczne (nieuciążliwe, uciążliwe), stres jako *s u b m o d e l* wchodzący w skład cech wewnętrznych (mały, średni, duży), wiek (młody, średni, dojrzały), pora jazdy (dzień, noc). Zmiennym lingwistycznym przypisano funkcje przynależności – krzywe gaussowskie. Według źródeł literaturowych (Evans, Karwowski, 1986; Mamdani, Gaines [eds.], 1981; Rutkowski, 2017; Szarata, 2013) funkcja ta jest najczęściej przyjmowana w modelach rozmytych. W modelowaniu metodami heurystycznymi poszczególnym cechom należy przyporządkować wartości liczbowe będące miarą danej cechy. Cechom mierzalnym można przypisać zmierzone wartości danej cechy. W analizowanych przypadkach cechy te są niemierzalne lub mają różny zakres wartości, dlatego też ich zakresy standaryzowano w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Problemy fuzyfikacji danych wejściowych oraz otrzymywania z nich po transformacji przez model symulacyjny wartości wielkości wyjściowej λ_L należą do typowych działań w modelowaniu rozmytym z zastosowaniem modelu Mamdaniego i są szczegółowo opisane (m.in. Mamdani, Gaines [eds.], 1981; Yager, Filev, 1995). Model Mamdaniego został zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink version 7.5 (Bęczkowska, 2014; Bęczkowska, Grabarek, Choromański, 2013; Bęczkowska, Grabarek, 2012a). Strukturę modelu generującego intensywność wystąpienia wypadku w wyniku popełnienia błędu przez czynnik ludzki przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Struktura modelu rozmytego intensywności wystąpienia wypadku na skutek błędu człowieka-kierowcy

(Figure 3. Heuristic Mamdani model of intensity of accident occurrence caused by driver error)

Źródło: opracowanie własne.

Obliczoną wartość λ_L z modelu rozmytego zaimplementowano do modelu oceny ryzyka. Autorski program generował trasę obciążoną najmniejszym ryzykiem w zależności od przyjętego kryterium. Optymalna wyznaczona trasa nie zawsze była trasą najkrótszą, lecz charakteryzowała się najmniejszym ryzykiem w stosunku do pozostałych. Takie podejście wyboru optymalnej trasy zostało uwzględnione w koncepcji systemu monitorowania gazu ziemnego. W kontekście powyższych rozważań należy podkreślić wieloaspektowość metody, ponieważ uwzględnia ona wpływ: człowieka-kierowcy na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku, proces narastania zmęczenia kierowcy w czasie wykonywania zadania przewozowego, stan techniczny pojazdów, oddziaływanie innych użytkowników drogi oraz natężenie ruchu wokół baz paliwowych – na wartość ryzyka strat o różnym charakterze. Monitorowanie transportu LNG uwzględniającego wybór optymalnej trasy w całym procesie jest też ważne ze względu na parametry, takie jak temperatura czy ciśnienie w cysternie z gazem, w danym momencie przewozu. Przy dłuższej trasie wzrost temperatury gazu powoduje wzrost jego objętości, a nadmierna ilość zostaje wydalona do atmosfery, co oczywiście zwiększa zanieczyszczenie powietrza, a dodatkowo naraża odbiorcę na straty.

6. Podsumowanie i wnioski

Proponowany system dostarczy danych niezbędnych do kontroli bezpieczeństwa transportu drogowego LNG (a w przyszłości innych towarów niebezpiecznych). Dzięki odpowiedniej obróbce tych informacji pozyska się szczegółowe dane statystyczne dotyczące transportu towarów, rodzaju ładunku, wykorzystywanych dróg, co umożliwi również działania prewencyjne dla bezpieczeństwa i ochrony środowiska naturalnego. System ten w przyszłości może zostać poszerzony o moduły monitorowania i zarządzania transportem innych rodzajów towarów niebezpiecznych oraz może zostać zintegrowany z innymi systemami monitorowania transportu, na przykład stosowanymi w transporcie morskim.

Do głównych korzyści systemu można zaliczyć:

- pełne monitorowanie oraz wybieranie alternatywnej, bezpiecznej trasy uwzględniającej natężenie ruchu, warunki pogodowe, inne niebezpieczne zdarzenia (np. wypadki, tunele) – przy czym podstawowym kryterium doboru trasy jest minimalizacja ryzyka związana z przewozem danego towaru niebezpiecznego, biorąca pod uwagę prawdopodobieństwo wystąpienia określonych strat w wyniku zaistnienia zdarzenia niepożądanego;
- zapewnienie bezpieczeństwa na terminalu poprzez kontrolowanie liczby cystern znajdujących się w tym samym czasie w jednym miejscu, będących potencjalnym źródłem zagrożenia terroryzmem;
- zwiększenie bezpieczeństwa na obszarze gazoportu na skutek kontrolowania ilości i właściwości innych substancji niebezpiecznych, potencjalnie mogących znajdować się na terminalu i mogących wchodzić w niebezpieczne reakcje z LNG;
- utworzenie jednego źródła informacji dla wszystkich zainteresowanych stron;
- zapewnienie bezpieczeństwa na drodze oraz minimalizacja potencjalnych skutków zagrożenia na obszarach dojazdowych do terminalu poprzez na przykład harmonizację natężenia ruchu na tych drogach;
- usprawnienie procesu tankowania cystern gazem (eliminacja kolejek, skrócenie czasu pracy kierowcy, zmniejszenie zmęczenia), usprawnienie oraz skrócenie czasu reakcji służb ratowniczych.

Możliwość wdrożenia opartego na powyższych założeniach systemu monitorowania wymaga aktywnego zainteresowania wszystkich interesariuszy, mających jednocześnie świadomość korzyści płynących z jego funkcjonowania.

Bibliografia

- Antonowicz, M., Syryjczyk, T., Faryna, P. (red.). (2015). *Biała księga: kolejowy transport towarowy 2015* [online, dostęp: 2017-07-26]. Warszawa: Forum Kolejowe – Railway Business Forum. Dostępny w Internecie: http://www.rbf.net.pl/pliki/file/RBF_BK_KTT_FINAL.pdf.
- Bęczkowska, S. (2014). *Ocena i minimalizacja ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych*. Praca doktorska. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Bęczkowska, S., Grabarek, I., Choromański, W. (2013). Model oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych – wybrane zagadnienia. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 96, 77–87.
- Bęczkowska, S., Grabarek, I. (2011). Znaczenie ergonomicznej jakości układu kierowca–cysterna–otoczenie w kształtowaniu bezpieczeństwa przewozów. W: E. Górska (red.). *Współczesne i przyszłe wyzwania ergonomii* (s. 143–153). Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 9788393098316.
- Bęczkowska, S., Grabarek, I. (2012a). Analysis of factors determining ergonomic conditions of driver's workplace and safety in transport of dangerous goods. *Archives of Transport*, 24(3), 297–306.
- Bęczkowska, S., Grabarek, I. (2012b). Czynniki ludzkie w ocenie ryzyka w transporcie towarów niebezpiecznych. *Technika Transportu Szybnego*, 9, 1–10.
- Evans, G.W., Karwowski, W. (1986). A perspective on mathematical modeling in human factors. W: W. Karwowski, A. Mital (eds.). *Applications of Fuzzy Set Theory in Human Factors* (s. 3–28). Amsterdam: Elsevier. ISBN 9781483294360.
- Jamroz, K., Smolarek, L. (2012). Analiza wpływu zmęczenia kierowców na ryzyko wypadków na drogach krajowych. *Drogownictwo*, 4, 121–126.
- Jamroz, K., Smolarek, L. (2013). Driver fatigue and road safety on Poland's national roads. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 19(2), 297–309.
- KGP. (2014). *Wypadki drogowe w Polsce w 2013 roku* [online, dostęp: 2017-05-20]. Warszawa: Komenda Główna Policji. Dostępny w Internecie: <http://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,Wypadki-drogowe-raporty-rocne.html>.

- Kopczewski, R., Nowacki, G., Krysiuk, C. (2016). Projekt struktury funkcjonalnej systemu bezpieczeństwa przewozu drogowego towarów niebezpiecznych. *Autobusy*, 10, 45–52.
- Mamdani, E.H., Gaines, B.R. (eds.). (1981). *Fuzzy Reasoning and Its Applications*. London: Academic Press. ISBN 0124677509.
- Martorell, S., Soares, G.C., Barnett, J. (2014). *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9781482266481.
- Materiały informacyjne Gaz System, www.gazsystem.pl [dostęp: 2017-05-20].
- Matthews, G., Desmond, P.A., Neubauer, C., Hancock, P.A. (eds.). (2012). *Handbook of Operator Fatigue*. Burlington, VT: Ashgate Publishing Company. ISBN 9780754675372.
- NIK. (2012). *Wykonywanie zadań przez administrację publiczną w zakresie bezpieczeństwa przewozu towarów niebezpiecznych: informacja o wynikach kontroli* [online, dostęp: 2017-05-20]. Warszawa: Najwyższa Izba Kontroli. Dostępny w Internecie: <https://www.nik.gov.pl/plik/id,3552,vp,4524.pdf>.
- Raport badań stateczności bocznej cystern Transportowego Dozoru Technicznego. (2017).
- Rutkowski, L. (2017). *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. ISBN 9788301157319.
- Statystyki UE. (2017), www.eurostat.eu [dostęp: 2017-05-20].
- Szarata, A. (2013). *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Szopa, T. (2016). *Niezawodność i bezpieczeństwo*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. ISBN 9788378145554.
- Yager, R.R., Filev, D.P. (1995). *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. ISBN 8320419093.

Monitoring as component of safety of dangerous goods transportation—system concept

Abstract: Carriage of goods by road continues to remain at a high level. This phenomenon, apart from positive aspects for the economy, has also negative and costly consequences, especially in the transport of dangerous goods. These goods, due to their nature, pose a serious threat to the environment and human health. The rules of transport supervision of such goods regulated by relevant standard documents and guidelines approved in the European Union and in Poland. Despite the increased security measures, adverse events with negative social, environmental and financial consequences often occur. This situation requires action in order to minimise the risk of carriage and improve its safety. One of such actions is the introduction of load monitoring from the recipient to the sender. Vehicle tracking systems are available on the market that use satellite navigation systems. Their purpose is, among

others, to determine vehicle location, fuel control or anti-theft protection. Unfortunately, they do not provide integrated monitoring which takes into account the multifaceted nature of the problem and, above all, the psychophysical assessment of the driver and its impact on minimising risk as well as minimising the effects of terrorist acts. The paper presents the concept of an integrated system that takes into account the current state of solutions in this area. The premise of the system development, its functioning, information flow between its participants and the role of the human factor in the system as well as the benefits of its implementation are discussed, the example being LNG transport. Furthermore, attention has also been drawn to the socio-economic implications of the functioning of the system as an essential element for increasing the level of safety in the carriage of particularly dangerous goods.

Key words: transport of dangerous goods, monitoring, safety, human factor