

Dr hab. inż. Mariusz Wasiak, prof. PW^{1,a}, Dr hab. inż. Ilona Jacyna-Golda^{2,b}, Dr Katarzyna Markowska^{3,c}, Dr inż. Roland Jachimowski^{1,d}, Dr inż. Michał Kłodawski^{1,e}, Dr inż. Mariusz Izdebski^{1,f}

¹Wydział Transportu
Politechnika Warszawska
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

²Wydział Inżynierii Produkcji
Politechnika Warszawska
Narbutta 86 str., 02-524 Warszawa, Polska

³Wydział Transportu
Politechnika Śląska
Kraśnińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska

E-mail: ^amwa@wt.pw.edu.pl, ^bi.jacyna-golda@wip.pw.edu.pl,
^ckatarzyna.markowska@polsl.pl, ^drjach@wt.pw.edu.pl, ^emkłoda@wt.pw.edu.pl,
^fmizdeb@wt.pw.edu.pl

Zastosowanie modelu konfiguracji łańcucha dostaw do oceny niezawodności realizacji procesów logistycznych

The use of a supply chain configuration model to assess the reliability of logistics processes

Słowa kluczowe: niezawodność procesów logistycznych, straty czasu w procesach logistycznych, łańcuch dostaw, modele symulacyjne

Keywords: reliability of logistic processes, loss of time in logistic processes, supply chain, simulation models

Streszczenie: W artykule przedstawiono podejście do oceny niezawodności procesów logistycznych realizowanych w łańcuchach dostaw w aspekcie strat czasu wynikających z wyboru wariantu realizacji przepływów materiałowych w łańcuchu dostaw. Na potrzeby tych badań opracowano model matematyczny łańcucha dostaw, tj. określono parametry problemu badawczego, zmienne decyzyjne, ograniczenia oraz kryteria oceny. Sposób oceny niezawodności systemu został przedstawiony w postaci schematu. Algorytm został zweryfikowany na podstawie danych eksperymentalnych. W celu oceny niezawodności procesów logistycznych dla przykładowego łańcucha dostaw opracowano model symulacyjny wyznaczający straty czasu w elementach punktowych i liniowych badanego łańcucha. Straty czasu podyktowane są opóźnieniami w ruchu drogowym wynikającymi z kongestii ruchu na poszczególnych odcinkach trasy i węzłach drogowych oraz opóźnieniami w elementach punktowych łańcucha dostaw.

Abstract: The article presents an approach to assessing the reliability of logistics processes implemented in supply chains in terms of time losses resulting from the selection of a variant of material flows in the supply chain. In order to define this indicator, a mathematical model of the supply chain has been developed, i.e. the parameters of the research problem, the decision variables, the constraints and the evaluation criteria. The method of evaluating the reliability of the system is presented in diagram form. The algorithm was verified based on experimental data. In order to evaluate the reliability of the logistic processes for the sample supply chain, a simulation model was developed that determines the time losses in the points and linear elements of the examined chain. Time losses are dictated by traffic delays resulting from traffic congestion on particular sections of the route and road junctions and delays in point elements in the supply chain.

1. Wprowadzenie

Łańcuch dostaw, na ogół, rozumiany jest jako grupa przedsiębiorstw takich jak: firmy wydobywcze, produkcyjne czy dystrybucyjne itp., realizująca wspólne działania niezbędne do zaspokojenia popytu finalnych odbiorców na określone produkty. Koordynacja działań jest tu realizowana w całym łańcuchu przepływu dóbr od pozyskania surowców do dostaw do ostatecznego odbiorcy. Działaniami tymi mogą być: rozwój, produkcja, sprzedaż, serwis, zaopatrzenie, dystrybucja, zarządzanie zasobami, działania wspierające itp. Rola i usytuowanie poszczególnych przedsiębiorstw - podmiotów w strukturze łańcucha dostaw wynika z podziału pracy na kolejnych etapach produkcji i sprzedaży wyrobów. Przenikające się łańcuchy dostaw stanowią sieć powiązań współzależnych organizacji, które działając na zasadzie wzajemnej współpracy, wspólnie kierują przepływami rzeczowymi i informacjami od dostawców do ostatecznych klientów, kontrolują je i usprawniają [1]. Można zatem powiedzieć, że podmioty funkcjonujące w łańcuchu dostaw poprzez powiązania z dostawcami i odbiorcami zaangażowane są w różne procesy i działania, które tworzą wartość w postaci produktów i usług dostarczanych ostatecznym konsumentom. Każda z firm zintegrowanych w łańcuchu dostaw odpowiada za określoną część realizowanych w nim przepływów.

W przepływach dóbr materialnych występuje wiele trudnych do przewidzenia sytuacji o negatywnym wpływie na ciągłość oraz jakość tych przepływów. Podstawowe ryzyka operacyjne¹ w tym zakresie z punktu widzenia ustalonego ogniwa łańcucha dostaw wynikają z następujących niepożądanych zdarzeń:

- opóźnienie w realizacji dostawy, np. ze względu na: zakłócenia organizacyjne u dostawcy, brak dostępności zamówionych materiałów u dostawcy, nieterminowe podstawienie środka przewozowego pod załadunek, błędny wybór trasy przewozu, warunki drogowe, pomyłki w realizacji dostawy, wydłużona odprawa celna,
- zbyt szybka dostawa, np. ze względu na nieterminowe podstawienie środka przewozowego pod załadunek, warunki drogowe,
- niekompletna dostawa, np. ze względu na brak dostępności wszystkich zamówionych materiałów u dostawcy oraz uszkodzenia lub kradzieże podczas transportu,
- nieodpowiednia jakość dostarczonych dóbr, np. ze względu na niedotrzymanie wymaganych warunków transportu,
- uszkodzenia magazynowanych dóbr materialnych,
- zesterzenie się (zepsucie) magazynowanych dóbr materialnych,
- kradzieże magazynowanych dóbr materialnych,
- awarie urządzeń transportu wewnętrznego i innego wyposażenia magazynu,
- strajki pracowników,
- wypadki przy pracy,
- nietypowe, bardzo duże zamówienia klientów,
- awarie systemów informatycznych,
- katastrofy naturalne i zdarzenia nadzwyczajne.

Wymienione niepożądane zdarzenia mają niekwestionowany wpływ na ciągłość przepływu dóbr materialnych, w tym na możliwość zaspokojenia popytu klienta, choć wpływ ten z różnym powodzeniem jest minimalizowany poprzez stosowanie przemysłanych strategii zarządzania zapasami. Tym nie mniej ocena tych strategii powinna być realizowana również z uwzględnieniem ich wpływu na niezawodność procesów logistycznych.

Z punktu widzenia niezawodności procesów dostaw w łańcuchu logistycznym wyróżniane są następujące wskaźniki: terminowość dostaw, niezawodność dostaw (kompletne dostawy zamówionych dóbr o odpowiedniej jakości), jak również gotowość do realizacji

¹ Ogólnie w ocenach ryzyka wyróżnia się również ryzyka legislacyjne, finansowe oraz strategiczne [36].

dostaw oraz jakość i elastyczność dostaw. Przy czym te ostatnie dotyczą możliwości reagowania dostawców w sytuacjach awaryjnych. Oczywiście determinantami niezawodności procesów logistycznych w łańcuchach dostaw są zawsze tzw. słabe ogniwa.

Badanie niezawodności złożonych systemów, jakim jest łańcuch dostaw wymaga uwzględnienia szeregu czynników. Efektywność funkcjonowania łańcucha dostaw determinowana jest skutecznością jego działania. Ważnym aspektem jest zwymiarowanie czynników, które wpływają na efektywność funkcjonowania łańcuchów dostaw, a szczególnie na te aspekty funkcjonowania łańcucha dostaw, które mają wpływ na jego niezawodność. Jednym z istotnych uwarunkowań niezawodności łańcuchów dostaw jest terminowość realizowanych procesów logistycznych. Mając to na uwadze, dla ustalonej struktury łańcucha dostaw, zaproponowano podejście do oceny niezawodności łańcucha dostaw ze względu na straty czasu wynikające z różnego typu opóźnień przy realizacji zadań.

2. Stan wiedzy

W technice niezawodność systemu (obiektu technicznego) definiowana jest zwykle jako zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu oraz wpływające na nią nieuszkodzalność (ang. *reliability*), obsługiwalność (ang. *maintainability*) i zapewnienie środków obsługi (ang. *maintenance support*). Termin niezawodność (ang. *dependability*) jest używany tylko do ogólnego jakościowego opisu właściwości obiektu technicznego.

Nowakowski [30] zwraca uwagę na następujące podstawowe różnice w zakresie zastosowania aparatu teorii niezawodności do opisu obiektów technicznych oraz procesów logistycznych:

- niezawodność jest rozumiana jako miara realizacji zadania w czasie, co można porównać do pojęcia nieuszkodzalności,
- zarówno w ujęciu logistycznym jak i technicznym korzysta się w podobny sposób z pojęcia gotowości,
- w ujęciu logistycznym nie sformułowano odpowiednika charakterystyki obsługiwalności lub naprawialności (nie ocenia się czynności przeciwdziałających pojawieniu się błędów, bowiem brak jest wskaźników charakteryzujących usuwanie skutków wystąpienia błędu),
- wszystkie miary mają charakter współczynników lub wskaźników struktury – nie korzysta się z innych charakterystyk, mimo że oceniane procesy są procesami losowymi.

Zatem według [30] niezawodność działania łańcucha dostaw oznacza między innymi: terminowe wykonania zadania, kompletną realizację zamówienia, otrzymanie oraz wydanie towaru bez żadnych uszkodzeń.

Do badania szybkości reakcji i niezawodności elementów łańcucha dostaw, tj. w celu ustalenia, czy relacje w łańcuchu dostaw mają wysoki współczynnik niezawodności, czy też nie, przedsiębiorstwa wykorzystują model SCOR (referencyjny model łańcucha dostaw, ang. *Supply Chain Operation Reference-Model*) [38]. Model SCOR służy do opisu i kompleksowej analizy łańcucha dostaw [18]. Pozwala on na mierzenie, kontrolowanie i zarządzanie procesami w całym łańcuchu dostaw, obejmując wszystkich uczestników (producentów, firmy transportowe, dystrybutorów, konsumentów).

Niezawodność dostaw jak wskazuje Twaróg [41] to iloraz terminowo dostarczonych zamówień do całkowitej liczby zamówień. Jakość dostaw może być mierzona ilorazem liczby reklamacji i całkowitej liczby zamówień. Natomiast elastyczność dostaw (zdolność do dostosowania się do potrzeb klientów) może być określona ilorazem liczby spełnionych życzeń specjalnych do liczby tych życzeń. Gotowość do świadczenia dostaw może być natomiast wyrażona przez iloraz liczby zamówień zrealizowanych z magazynu do całkowitej liczby zamówień. Z kolei jak wynika z [27] i [29] niezawodność należy do czynników niewymiernych uwzględnianych przy projektowaniu systemów logistycznych. Miarą niezawodności

funkcjonowania są zakłócenia lub stopień obniżenia wydajności. W tym kontekście analizie poddawana jest elastyczność układu, tj. zdolność adaptacji.

Liczne badania dotyczące problemów niezawodności łańcuchów dostaw biorą pod uwagę zagadnienia dotyczące obniżenia wydajności systemu i zmian obciążenia tras przemieszczania ([2]). Natomiast badania dotyczące niezawodności sieci połączeń opisane w [8] i [11] skupiają się głównie na łączności i niezawodności w czasie podróży.

Jednym z podejść do analizy niezawodności łańcuchów dostaw jest Analiza Drzew Błędów [16], która jest probabilistycznym podejściem pozwalającym na analizę bezpieczeństwa, niezawodności, czy ryzyka. Metoda dynamicznych drzew niezdatności (DFT) została opisana m.in. w [12] i [13]. Przyjęto tam, iż dynamiczne bramki DFT mogą definiować:

- dynamiczną wymianę uszkodzonych komponentów komponentami zapasowymi,
- pojawianie się uszkodzeń tylko we wcześniej ustalonej kolejności.

Zastosowanie czterostopniowego modelu optymalizacji sieci dystrybucji w obrębie łańcucha dostaw wykorzystującego tzw. teorię systemów szarych (grey systems theory) do uwzględnienia niepewności zjawisk i informacji zostało zaproponowane w [44]. Natomiast w [9] opisano zagadnienia redukcji ryzyka przerwania łańcucha dostaw. Wskazano przy tym, że podstawowe metody zmniejszania ryzyka, tj. tworzenie rezerw, zwiększanie wydajności obiektów logistycznych i współpraca z wieloma dostawcami znacznie zwiększają koszty. Zatem zwiększanie efektywności łańcucha dostaw to zwiększanie elastyczności badanego łańcucha na dostosowanie się do niekorzystnych zdarzeń i zmniejszenie ryzyka. Wzrost elastyczności łańcucha dostaw bez względnego zmniejszenia jego efektywności może nastąpić przez dzielenie go na segmenty oraz konfigurowanie i dopasowywanie poszczególnych ogniw do wymogów otoczenia. Podobne podejście opisano w [26], przy czym wykorzystano tam pojęcie zwinności (*agility*) łańcucha dostaw.

Inne podejście do zagadnienia niezawodności łańcucha dostaw zaproponowano w [37], gdzie wykorzystano modelowanie rozmyte do modelowania zależności pomiędzy wymaganiami klientów oraz wymaganą niezawodnością rozwiązań w kontekście zarządzania łańcuchem dostaw.

W [34] zauważono, że większość aktualnych badań nad niepewnością, a tym samym wydajnością i efektywnością łańcuchów dostaw skupia się na relacjach między wytwórcami a dostawcami i większość opracowanych modeli bazuje właśnie na tej dwoistej relacji. Dodano tam, więc trzeci element – faktycznie kluczową operację logistyczną – transport, jako naturalne uzupełnienie modelu do badania łańcucha dostaw w warunkach niepewności. Dzięki temu uzyskany model lepiej odzwierciedla warunki pracy łańcucha dostaw i wskazuje potencjalne punkty redukcji niepewności. Model opisany w [34] obejmuje analizę niepewności z punktu widzenia dostawcy, klienta i przewoźnika.

Zgodnie z powyższym w zagadnieniach dostaw dóbr materialnych często należy uwzględnić elementy niepewności dotyczące chociażby zapotrzebowania klientów, czy czasu jazdy pojazdów. Wiąże się to z dynamicznym problemem układania tras pojazdów (*dynamic VRP*). Podczas rozwiązywania tych problemów, informacje będące przedmiotem niepewności są uaktualniane dzięki wykorzystaniu najnowszych technologii takich jak chociażby GPS, czy też różnego rodzaju systemy telematyczne. Rezultaty przeprowadzonych w tym zakresie badań można znaleźć m.in. w [6]. Zagadnienia poszukiwania najkrótszych dróg są ciągle bardzo aktualne. Wielu badaczy zajmujących się tym problemem poszukuje efektywnych algorytmów znajdowania najkrótszych ścieżek (np. [19]).

Na wydajność, produktywność oraz sposób realizacji procesów logistycznych duży wpływ mają różnego typu zjawiska losowe. Źródła zjawisk losowych mogą być zlokalizowane zarówno w obiektach magazynowych lub funkcjonujących w nich systemach zarządzania, jak również w bliższym i dalszym otoczeniu. Ze względu na losowość zjawisk determinujących sposób realizacji procesów w obiektach logistycznych bardzo często podczas

badania tych obiektów ma zastosowanie podejście wykorzystujące aparat teorii procesów stochastycznych [43].

W badaniach i analizie łańcuchów dostaw pod kątem niezawodności realizowanych w nich procesów szerokie zastosowanie ma teoria masowej obsługi oraz badania symulacyjne [2].

Mając na uwadze podejmowane w literaturze aspekty badania niezawodności łańcuchów dostaw, jako cel badań przyjęto opracowanie modelu konfiguracji łańcucha dostaw, który, przy uwzględnieniu oceny niezawodności realizacji procesów logistycznych w łańcuchach dostaw ze względu na całkowite straty czasu wynikające z kongestii ruchu na poszczególnych odcinkach trasy i węzłach drogowych oraz opóźnień w elementach punktowych łańcucha dostaw, umożliwi wybór najlepszego wariantu konfiguracji łańcucha dostaw. Należy tu jednocześnie podkreślić możliwość stosowania różnych wariantów konfiguracji łańcuch dostaw poprzez włączanie w przepływy fizyczne pośrednich obiektów magazynowych. Dzięki temu można ograniczyć konieczność stosowania pojazdów małotonażowych, a w konsekwencji i negatywne skutki transportu.

Niezależnie od wariantu konfiguracji łańcucha dostaw, zarówno czasy obsługi strumieni fizycznych w punktowych elementach łańcucha dostaw, jak i na połączeniach transportowych między nimi odwzorowywane są za pomocą zmiennych losowych (wynikają z występujących w danej chwili warunków ruchu). W takim ujęciu procesy logistyczne realizowane w łańcuchach dostaw są procesami stochastycznymi.

Mając powyższe na uwadze, można stwierdzić, że czasy realizacji przepływów fizycznych w łańcuchu dostaw są ściśle uzależnione od czynników losowych, np. awaria urządzenia transportu wewnętrznego lub pojazdu, wypadki, błędy w sterowaniu, błędy ludzkie, spiętrzenia w przepływach. Te z kolei decydują o niezawodności danego procesu logistycznego. Istotne znaczenie ma, więc opracowanie metody oceny niezawodności realizacji procesów logistycznych w aspekcie czasu realizacji tych procesów, a w szczególności w aspekcie strat czasu. Straty czasu są tu rozumiane jako wydłużenie czasu realizacji danego procesu względem nominalnego czasu jego wykonania. W praktyce projektowej uwzględnia się różne współczynniki odwzorowujące wydłużenie nominalnego czasu realizacji danej czynności (np. współczynniki warunków pracy), czy też zależności funkcyjne (np. funkcja zależności średniej prędkości realizacji danego procesu od liczby obsługiwanych jednostek), tym nie mniej pomijane są tu zdarzenia awaryjne. Ponadto w literaturze brak jest metody konfiguracji łańcucha dostaw z uwzględnieniem oceny niezawodności realizacji procesów logistycznych ze względu na całkowite straty czasu.

3. Model konfiguracji łańcucha dostaw ze względu na niezawodność realizacji procesów logistycznych

Z punktu widzenia niezawodności procesu logistycznego, wszystkie elementy (ogniwa) łańcucha dostaw muszą spełniać określone oczekiwania w zakresie ich wydajności. Oznacza to, że ogniwa te mogą być traktowane jako system niezawodności całej serii. Zawodność jednego lub więcej ogniw przekłada się na zawodność całego łańcucha. I odwrotnie niezawodność poszczególnych ogniw łańcucha dostaw, sprawia, że może on spełnić oczekiwania dotyczące wydajności na wszystkich obszarach w swoim otoczeniu. Jednocześnie należy podkreślić, że optymalizacja rozwiązań w obszarze logistyki zawsze jest realizowana jednocześnie przy uwzględnieniu kryteriów oceny jakości (poziomu obsługi) oraz kryteriów oceny kosztów procesów logistycznych. Sprawia to, że stosowane są podejścia wielokryterialne lub (w klasycznym ujęciu) podejście jednokryterialne, w którym kryterium oceny jest koszt, zaś wskaźniki oceny jakości są ujmowane w ograniczeniach. Mając na uwadze powyższe, oraz cel badań, zaproponowano model konfiguracji łańcucha dostaw,

w którym uwzględniono dwa kryteria oceny rozwiązań (koszty oraz prawdopodobieństwo wystąpienia strat czasu), zaś wśród ograniczeń wzięto pod uwagę dodatkowo wymagania dotyczące realizacji procesów logistycznych w określonym czasie. W modelu tym wśród danych charakteryzujących wyżej wymienione funkcje kryteriów uwzględniono następujące wielkości:

- zbiór wariantów konfiguracji łańcucha dostaw: $\mathbf{LD} = \{ld: ld = 1, \dots, LD\}$,
- zbiory numerów ogni łańcucha dostaw w wariantach jego konfiguracji, $V(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- zbiory powiązań między ogniwami w wariantach konfiguracji łańcucha dostaw, $\mathbf{LF}(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- zbiory początków relacji przemieszczania dóbr $A(ld)$ i zbiory końców tych relacji w wariantach łańcucha dostaw $\mathbf{B}(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- zbiory numerów marszrut, które w wariantach konfiguracji łańcucha dostaw mogą łączyć początki z końcami relacji przemieszczania, $\mathbf{E}(ld, a, b)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $a \in A(ld)$, $b \in \mathbf{B}(ld)$,
- zbiory łuków tworzących w poszczególnych relacjach marszrut, $\mathbf{EL}(ld, a, b, e)$
- ustalone dla wariantów łańcucha dostaw zbiory typów pojazdów $\mathbf{STZ}(ld)$,
- ustalone dla wariantów łańcucha dostaw oraz występujących w nich ogniów zbiory typów pojazdów $\mathbf{STZV}(v, ld)$, zbiory typów środków transportu wewnętrznego $\mathbf{STWV}(v, ld)$,
- zbiory numerów rodzajów dóbr materialnych obsługiwanych w wariantach konfiguracji łańcucha dostaw, $\mathbf{H}(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- długości połączenia między ogniwami łańcucha dostaw w poszczególnych wariantach jego konfiguracji, $\ell(ld, (v, v'))$, $ld \in \mathbf{LD}$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$,
- zmienna losowa o interpretacji chwilowego obciążenia potokiem ruchu połączenia między ogniwami łańcucha dostaw w poszczególnych wariantach jego konfiguracji, $q_0(ld, (v, v'), t)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$, której wartość średnia jest równa $\overline{q_0}(ld, (v, v'), t)$
- prędkości pojazdów w ruchu swobodnym pomiędzy ogniwami łańcucha dostaw dla wariantów jego konfiguracji, $vs(st, ld, (v, v'))$, $ld \in \mathbf{LD}$, $st \in \mathbf{STZ}(ld)$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$,
- koszty korzystania przez pojazdy z połączeń drogowych między ogniwami łańcucha dostaw dla wariantów jego konfiguracji, $kd(st, ld, (v, v'))$, $ld \in \mathbf{LD}$, $st \in \mathbf{STZ}(ld)$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$,
- koszty stałe dla wariantów konfiguracji łańcucha dostaw, $K(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- ponoszone na jednostkę odległości $kl(ld, v, st)$ oraz na jednostkę czasu koszty eksploatacji pojazdów poszczególnych typów, które są w dyspozycji ogni łańcucha dostaw $kh(ld, v, st)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $v \in V(ld)$, $st \in \mathbf{STZV}(v, ld)$,
- koszt eksploatacji środka transportu wewnętrznego st -tego typu przez v -ty element ld -tego łańcucha dostaw $kw(ld, v, st)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $v \in V(ld)$, $st \in \mathbf{STZV}(v, ld)$,
- zbiór przedziałów czasu $\mathbf{T} = \{t: t = 1, 2, \dots, T\}$.

Natomiast zmienne decyzyjne dotyczą:

- wyboru wariantu konfiguracji łańcucha dostaw, $x(ld)$, $ld \in \mathbf{LD}$,
- czasów zaangażowania pojazdów w obsługę strumieni ładunków w wybranym wariantcie konfiguracji łańcucha dostaw, $y1(ld, st, (v, v'), v'', a, b, e, h)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $v'' \in V(ld)$, $st \in \mathbf{STZV}(v'', ld)$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$, $a \in A(ld)$, $b \in \mathbf{B}(ld)$, $e \in \mathbf{E}(ld, a, b)$, $h \in \mathbf{H}(ld)$,
- czasów zaangażowania środków przeładunkowych w obsługę strumieni ładunków w wybranym wariantcie konfiguracji łańcucha, $y2(ld, st, v, h)$, $ld \in \mathbf{LD}$, $v \in V(ld)$, $st \in \mathbf{STWV}(v, ld)$, $h \in \mathbf{H}(ld)$,

- liczby przejazdów bez ładunku dla pojazdów między ogniwami łańcucha dostaw w wybranym wariantcie jego konfiguracji, $zpl(ld, st, (v, v'), v'')$, $ld \in \mathbf{LD}$, $v'' \in \mathbf{V}(ld)$, $st \in \mathbf{STZ}(ld)$, $(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$,

W opracowanym modelu, przy uwzględnieniu opisanych danych należy wyznaczyć wartości powyższych zmiennych decyzyjnych tak, aby spełnione zostały ograniczenia dotyczące:

- wyboru struktury łańcucha dostaw i marszrut transportowo-magazynowych,
- zagwarantowania, że całkowity czas pracy pojazdów nie będzie dłuższy niż dysponowany,
- wykorzystania czasu pracy środków przewozowych,
- zapewnienia, że uzyskany czas realizacji usług logistycznych będzie akceptowany przez uczestników łańcucha dostaw, co wiąże się z wyborem odpowiedniej marszruty technologicznej dla każdej relacji oraz z doбором takich środków technicznych, które zapewnią realizację w tej relacji usług logistycznych w czasie nie dłuższym niż oczekiwany przez uczestników łańcucha dostaw, oraz, aby funkcja kryterium o interpretacji kosztów przepływu (wzór (2)) oraz / lub funkcja kryterium o interpretacji prawdopodobieństwa wystąpienia strat czasu (wzór (4)) przyjęły wartości minimalne.

$$\begin{aligned}
WKC(ld) = & K(ld) \cdot x(ld) + \sum_{st \in \mathbf{STZ}(ld)} \sum_{(v, v') \in \mathbf{LF}(ld)} \sum_{v'' \in \mathbf{V}(ld)} \left[(zll(ld, st, (v, v'), v'') + zp1(ld, st, (v, v'), v'')) \cdot \right. \\
& \cdot \left. \left(kd(st, ld, (v, v')) + \ell(ld, (v, v')) \cdot kl(ld, v'', st) + \frac{\ell(ld, (v, v'))}{vs(st, ld, (v, v'))} \cdot kh(ld, v'', st) \right) \right] + \\
& + \sum_{v \in \mathbf{V}(ld)} \sum_{st \in \mathbf{STWV}(v, ld)} \left[kw(ld, v, st) \cdot \sum_{h \in \mathbf{H}(ld)} y2(ld, st, v, h) \right] \xrightarrow{ld \in \mathbf{LD}} \min
\end{aligned} \tag{2}$$

gdzie $zll(ld, st, (v, v'), v'')$ jest liczbą kursów z ładunkiem wyznaczaną następująco:

$$\forall ld \in \mathbf{LD} \quad \forall v'' \in \mathbf{V}(ld) \quad \forall st \in \mathbf{STZV}(v'', ld) \quad \forall (v, v') \in \mathbf{LF}(ld)$$

$$zll(ld, st, (v, v'), v'') = \frac{vs(st, ld, (v, v'))}{\ell(ld, (v, v'))} \tag{3}$$

$$\cdot \sum_{h \in \mathbf{H}(ld)} \sum_{a \in \mathbf{A}(ld)} \sum_{b \in \mathbf{B}(ld)} \sum_{e \in \mathbf{E}(ld, a, b); (v, v') \in \mathbf{EL}(ld, a, b, e)} y1(ld, st, (v, v'), v'', a, b, e, h)$$

$$R(ld) = P(\Delta T(ld) \leq t_g) \xrightarrow{ld \in \mathbf{LD}} \max \tag{4}$$

gdzie t_g to uwzględniana w marszrutach technologicznych dopuszczalna wielkość strat czasu, a $\Delta T(ld)$ to rzeczywista wielkość strat w przepływach strumieni fizycznych dla ld -tego wariantu konfiguracji łańcucha dostaw liczona następująco:

$$\begin{aligned}
\forall ld \in LD \quad \Delta T(ld) = & \sum_{h \in H(ld)} \sum_{v \in V(ld)} \sum_{st \in STWV(v,ld)} \left[\operatorname{sgn}(y2(ld, st, v, h)) \int_{t=0}^T \omega 2(ld, st, v, h, t) dt \right] + \\
+ & \sum_{h \in H(ld)} \sum_{a \in A(ld)} \sum_{b \in B(ld)} \sum_{e \in E(ld, a, b)} \sum_{v \in V(ld)} \sum_{st \in STZV(v,ld)} \sum_{(v', v'') \in EL(ld, a, b, e)} \left[\operatorname{sgn}(y1(ld, st, (v', v''), v, a, b, e, h)) \cdot \right. \\
& \left. \int_{t=0}^T \omega 1(ld, st, (v', v''), v, a, b, e, h, t) dt \right] \quad (5)
\end{aligned}$$

gdzie $\omega 2(ld, st, v, h, t)$ to funkcja odwzorowująca straty czasu środków transportu wewnętrznego st -tego typu podczas obsługi dóbr materialnych h -tego rodzaju w v -tym ogniwie łańcucha dostaw dla ld -tego wariantu jego konfiguracji, zaś $\omega 1(ld, st, (v', v''), v, a, b, e, h, t)$ to funkcja odwzorowująca straty czasu środków przewozowych st -tego typu, które są w dyspozycji v -tego ogniwa łańcucha dostaw, podczas obsługi dóbr materialnych h -tego rodzaju na (v', v'') -tym połączeniu między ogniwami łańcucha dostaw stanowiącym element e -tej marszruty wyróżnionej między a -tym a b -tym ogniwem łańcucha dostaw dla ld -tego wariantu jego konfiguracji.

Straty czasu w przepływach dóbr materialnych są jednym z ważniejszych miar oceny realizacji zadań logistycznych w łańcuchach dostaw z punktu widzenia niezawodności. Straty te powstają na skutek sytuacji konfliktowych występujących podczas realizacji procesów logistycznych. W zaproponowanym podejściu dokonuje się ich identyfikacji przy wykorzystaniu metod symulacyjnych, bowiem w praktyce straty czasu w poszczególnych elementach łańcucha dostaw wynikają z decyzji dotyczących wyboru ścieżek technologicznych oraz doboru zasobów do ich realizacji, jak również z szeregu innych zdarzeń losowych.

Dodatkowo postać funkcji odwzorowujących straty czasu jest silnie zależna od rodzaju tych elementów oraz od ich szczegółowych parametrów. Przykładowo, w modelach ruchu drogowego stosowanych jest wiele postaci analitycznych funkcji odwzorowujących wydłużenie czasu jazdy ze względu na natężenie ruchu drogowego, przy czym identyfikacja oraz parametryzacja tych funkcji w odniesieniu do poszczególnych odcinków sieci transportowej wymaga wykonania pogłębionych badań. Jako przykładową można tu wskazać, dość często stosowaną w praktyce, funkcję BPR2 o postaci:

$$\begin{aligned}
T(st, (v, v'), t) = & T_0(st, (v, v')) + \\
+ & \begin{cases} \alpha(v, v') \cdot T_0(st, (v, v')) \cdot \left(\frac{q((v, v'), t)}{c(v, v') \cdot q_{\max}(v, v')} \right)^{\beta(v, v')} & , \text{gdzi } q((v, v'), t) < c(v, v') \cdot q_{\max}(v, v') \\ \alpha(v, v') \cdot T_0(st, (v, v')) \cdot \left(\frac{q((v, v'), t)}{c(v, v') \cdot q_{\max}(v, v')} \right)^{\beta'(v, v')} & , \text{przeciwnie} \end{cases} \quad (6)
\end{aligned}$$

gdzie $T((v, v'), t)$ to charakterystyczny dla chwili t rzeczywisty czas przejazdu połączenia (v, v') , $\min, T_0(v, v')$ – czas przejazdu połączenia (v, v') przy ruchu swobodnym (dla $q((v, v'), t) = 0$), $\min, q((v, v'), t)$ – zidentyfikowany dla chwili t potok ruchu na połączeniu (v, v') , poj./h , $q_{\max}(v, v')$ – zdolność przepustowa połączenia (v, v') , poj./h , $c(v, v')$ – współczynnik określający część zdolności przepustowej połączenia (v, v') charakterystyczną dla poziomu swobody ruchu C , zaś $\alpha(v, v')$, $\beta(v, v')$, $\beta'(v, v')$ to ustalane empirycznie parametry modelu dla połączenia (v, v') .

Należy jednocześnie zauważyć, że uwzględniane tu obciążenie odcinków sieci transportowej wynika z decyzji dotyczącej konfiguracji danego łańcucha dostaw, jak i przede wszystkim z dotychczasowego rozłożenia potoków ruchu w danej sieci transportowej, które

jest zjawiskiem losowym. W konsekwencji identyfikacja funkcji odwzorowujących straty czasu oraz ich parametrów musi być wykonana indywidualnie dla poszczególnych elementów danej sieci logistycznej. Natomiast obciążenia elementów uwzględniane podczas obliczania wydłużenia czasów obsługi, które wynikają z innych niż analizowane procesy logistyczne, mogą być przyjmowane jako wartości średnie charakterystyczne dla danej chwili (pory dnia), lub losowane zgodnie ze zidentyfikowanym rozkładem prawdopodobieństwa, który to zjawisko opisuje.

Powyższe uwarunkowania sprawiają, że wartość funkcji $R(ld)$ jest wyznaczana na podstawie dystrybuanty empirycznej uzyskiwanej eksperymentalnie przy uwzględnieniu losowości stanu elementów systemu logistycznego.

Niezawodność łańcucha dostaw można również rozpatrywać z punktu widzenia niezawodności realizowanych zadań. W tym aspekcie należy dodatkowo uwzględnić wskaźniki niezawodnościowe środków przewozowych i urządzeń ładunkowych oraz kategorii pracy ludzkiej. Dzięki temu poprzez przypisanie zasobów o największej niezawodności do realizacji odpowiednich pod względem niezawodnościowym, ciągów technologicznych uzyskuje się gwarancję skutecznej realizacji zadań logistycznych w łańcuchu dostaw.

4. Algorytm oceny niezawodności realizacji zadań logistycznych

Na potrzeby oceny niezawodności funkcjonowania łańcucha dostaw ze względu na prawdopodobieństwo ponadnormatywnych strat czasu w realizacji zadań logistycznych, które uzależnione są od sytuacji losowych występujących podczas przewozu, operacji przeładunkowych i innych przekształceń dokonywanych w łańcuchu dostaw na strumieniach fizycznych, opracowano algorytm wyznaczający rozkład sum strat czasu w przepływie dóbr materialnych oraz prawdopodobieństwo, że straty czasu nie będą większe niż dopuszczalne. W artykule przedstawiono uproszczoną postać tego algorytmu uwzględniając jeden wariant konfiguracji łańcucha dostaw oraz jedną relację przemieszczania dóbr materialnych w ramach jednej marszruty, jak również jeden rodzaj ładunku.

Na potrzeby opracowania algorytmu wyznaczania prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych strat czasu wprowadzono oznaczenie ex o interpretacji numeru eksperymentu symulacyjnego oraz EX o interpretacji liczby tych eksperymentów.

Kroki opracowanego algorytmu można przedstawić w następujący sposób:

Krok 1. Wprowadź dane wejściowe obejmujące m.in.: LD , $V(ld)$, $A(ld)$, $B(ld)$, $E(ld, a, b)$, $STZ(ld)$, $STW(ld)$, $H(ld)$, jak również warianty realizacji procesów logistycznych (marszruty technologiczne oraz przypisane do ich realizacji środki pracy i pracownicy).

Krok 2. Numer eksperymentu $ex := 1$;

Krok 3. Symulacyjne odwzorowanie dla bieżącego eksperymentu (ex) zakłóceń związanych m.in. z niepewnością zamówień oraz z niesprawnością środków pracy, jak również dotychczasowego obciążenia elementów systemu logistycznego.

Krok 4. Opracowanie dla bieżącego eksperymentu (ex) harmonogramów realizacji procesów przepływu dóbr materialnych z uwzględnieniem strat czasu wynikających z zakłóceń oraz powstałych w związku z nimi sytuacji konfliktowych. Uwzględnia się w tych celu chwilę zainicjowania przepływu oraz kolejne jego etapy.

Krok 5. Wyznaczenie wielkość strat w przepływach strumieni fizycznych dla bieżącego eksperymentu (ex) oraz dla poszczególnych wariantów konfiguracji łańcucha dostaw $ld \in LD$ według zależności (5).

Krok 6. Czy $ex = EX$?

NIE: Przyjmij $ex := ex + 1$ oraz przejdź do kroku 3.

TAK: Przejdź do kroku 7.

Krok 7. Wyznaczenie empirycznego rozkładu średnich strat czasu w przepływach strumieni fizycznych dla poszczególnych wariantów konfiguracji łańcucha dostaw $ld \in \mathbf{LD}$.

Krok 8. Wyznaczenie wartości funkcji celu (4) dla poszczególnych wariantów konfiguracji łańcucha dostaw $ld \in \mathbf{LD}$.

Krok 9. Porównanie wariantów konfiguracji łańcucha dostaw ze względu na przekroczenie dopuszczalnych strat czasu w przepływach strumieni fizycznych.

5. Praktyczne zastosowanie

Straty czasu na połączeniach między ogniwami łańcucha dostaw oraz w jego elementach punktowych zasymulowano za pomocą algorytmu opisanego w poprzednim rozdziale. Uwzględniono tu, zatem dodatkowe zakłócenia oraz spiętrzenia w przepływach strumieni fizycznych, jak również aktualne, losowe obciążenie elementów sieci logistycznej. W symulacji założono, iż w ogniwach łańcucha dostaw oraz w elementach liniowych straty czasu opisane zostały rozkładem wykładniczym o ustalanych indywidualnie parametrach ($\lambda = 0,5$). Prawdopodobieństwo wystąpienia strat czasu $R(ld)$ w całym łańcuchu dostaw zostało wyznaczone jako iloczyn prawdopodobieństw w poszczególnych jego elementach (nazwane w modelu symulacyjnym prawdopodobieństwami cząstkowymi) $R'(ld)$, gdyż zdarzenia losowe w poszczególnych obiektach łańcucha dostaw są traktowane jako zdarzenia losowo niezależne. Dystrybuanta rozkładu wykładniczego, na podstawie której wyznaczono prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych strat czas przedstawiono jako:

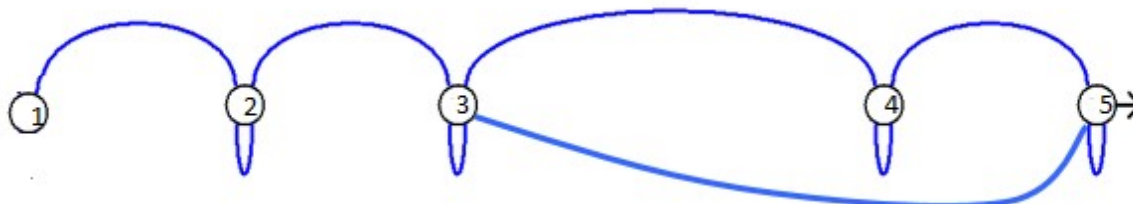
$$P(X < T^{\text{dop}}) = 1 - e^{-\lambda T^{\text{dop}}} \quad (7)$$

Analizowany łańcuch dostaw tworzą następujące elementy: dostawcy {1, 2}, producent {3}, magazyn dystrybucyjny {4} oraz odbiorca {5}. Dostarczenie ładunku od producenta do odbiorcy może być zrealizowane na dwa sposoby: bezpośrednio na relacji producent – odbiorca {(3, 5)} lub pośrednio z wykorzystaniem magazynu dystrybucyjnego {(3, 4), (4, 5)} – rys. 1.

Biorąc pod uwagę powyższe oraz uwzględniając dwa typy pojazdów (o 16 oraz 33 miejscach paletowych) w badaniach symulacyjnych przepływu strumieni ładunków w łańcuchu dostaw uwzględniono następujące warianty:

- Wariant. 1. Częstsze bezpośrednie dostawy w relacji producent – odbiorca (mniejsze pojazdy). Przyjęto następujące wartości dopuszczalne w poszczególnych elementach łańcucha dostaw: dostawcy {1} – 5 [min.], dostawcy {2} – 4 [min.], producent {3} – 7 [min.], magazyn dystrybucyjny {4} – 6 [min.], odbiorca {5} – 4 [min.], wszystkie relacje na połączeniach – 8 [min.]. Częstsze dostawy narzucają minimalizowanie dopuszczalnych czasów strat w związku z nasyconym planem produkcji.
- Wariant. 2. Dostawy pośrednie realizowane w relacji producent – magazyn dystrybucyjny większymi pojazdami (rzadsze dostawy) oraz w relacji magazyn dystrybucyjny – odbiorca mniejszymi pojazdami (częstsze dostawy). Przyjęto następujące wartości dopuszczalne w poszczególnych elementach łańcucha dostaw: dostawcy {1} – 7 [min.], dostawcy {2} – 8 [min.], producent {3} – 7 [min.], magazyn dystrybucyjny {4} – 8 [min.], odbiorca {5} – 4 [min.], połączenie (3,4) - 9 oraz (4,5) – 7 [min], pozostałe relacje 9

- [min.]. Rzadsze dostawy stwarzają możliwość zwiększenia dopuszczalnych strat czasów i wynikają z mniej nasyconego planu produkcji.
- Wariant. 3. Rzadsze bezpośrednie i pośrednie dostawy w relacji producent – odbiorca (większe pojazdy), dowóz dóbr materialnych do producenta większymi pojazdami (rzadsze dostawy), dostawy do producenta częste. Przyjęto następujące wartości dopuszczalne w poszczególnych elementach łańcucha dostaw: dostawcy {1} – 5 [min.], dostawcy {2} – 4 [min.], producent {3} – 7 [min.], magazyn dystrybucyjny {4} – 8 [min.], odbiorca {5} – 8 [min.], połączenie (3,5), (3,4) i (4,5) - 8 oraz pozostałe relacje 5 [min.].



Rys. 1. Ogniwa łańcucha dostaw
Źródło: opracowanie własne.

W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa przekroczenia dopuszczalnych strat czasu $R(ld)$ dla analizowanych wariantów, straty czasu dla poszczególnych elementów łańcucha $R'(ld)$ zostały uwzględnione zgodnie z empirycznymi rozkładami prawdopodobieństwa. Wyniki uzyskane dla trzech opisanych wyżej wariantów przedstawiono w Tabeli 1. Koszty są wskaźnikami oceny przepływu ładunków w łańcuchach dostaw, które nie decydują o stratach czasu, więc zostały pominięte w analizie. Koszty są efektem strat czasu i mają odzwierciedlenie w rozliczeniach finansowych przepływu łańcuchu. Mając na uwadze wyniki przedstawione w Tabeli 1 można stwierdzić, iż głównym czynnikiem wpływającym na straty czasu w poszczególnych ogniwach oraz na elementach liniowych sieci logistycznej jest częstotliwość dostarczania ładunków. W przypadku częstych dostaw wymagana są minimalne straty czasu ze względu na terminowość realizacji poszczególnych zadań w łańcuchu i zachowanie płynności przepływu ładunku. Zgodnie z przyjętym rozkładem, wyznaczonym w sposób empiryczny (tj. rozkładem wykładniczym), można stwierdzić, iż częstotliwość dostaw w sposób negatywny wpływa na prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnych strat czasu w analizowanych łańcuchach dostaw. W każdym z elementów łańcucha dostaw zwiększanie czasu dopuszczalnych strat powoduje wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia tych strat. W analizowanych wariantach przedstawiono różną kombinację dopuszczalnych strat czasu w poszczególnych elementach w zależności od częstości dostaw. W wariantach 2 wymagania co do minimalizacji strat w poszczególnych elementach łańcucha wygenerowały najwyższe prawdopodobieństwo nieprzekroczenia tych strat.

Tab. 1. Wyniki badań symulacyjnych strat czasu w wariantach konfiguracji łańcucha dostaw oraz przydziału środków pracy

Element łańcucha dostaw	Prawdopodobieństwo cząstkowe przekroczenia dopuszczalnych strat czasu $R'(ld)$		
	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Dostawca materiałów (1)	0,91	0,96	0,91
Dostawca półproduktów (2)	0,86	0,98	0,86
Producent (3)	0,96	0,96	0,96
Magazyn dystrybucyjny (4)	0,95	0,91	0,98
Odbiorca (5)	0,86	0,86	0,98
Połączenie (1, 2)	0,98	0,98	0,91
Połączenie (2, 3)	0,98	0,98	0,91
Połączenie (3, 4)	0,98	0,98	0,98
Połączenie (4, 5)	0,98	0,96	0,98
Połączenie (3, 5)	0,98	0,98	0,98
Prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnych strat czasu $R(ld)$ dla wariantu	0,55	0,62	0,56

Zródło: opracowanie własne.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono podejście do badania niezawodności procesów logistycznych z uwzględnieniem prawdopodobieństwa przekroczenia całkowitych strat czasu generowanych w punktowych i liniowych elementach łańcucha dostaw. Straty czasu generowane w łańcuchu dostaw w dużej mierze uzależnione są także od warunków ruchu drogowego, jak również spiętrzeń w przepływach strumieni fizycznych (zwłaszcza w obiektach logistycznych) i opóźnień z tym związanych. W modelu symulacyjnym rozważano straty czasu wynikające z opóźnień generowanych w liniowych oraz punktowych elementach łańcucha dostaw, które stanowią dostawcy, odbiorcy oraz obiekty logistyczne (np. punkty przeładunkowe) i inne podmioty występujące w fizycznych przepływach dóbr materialnych.

Dalsze badania nad oceną niezawodności procesów logistycznych w aspekcie wyznaczania całkowitych strat czasu mogą być prowadzone poprzez rozbudowanie modelu matematycznego o dodatkowe czynniki losowe generujące straty czasu, np. wypadki, błędny wybór trasy przez kierowców.

Należy podkreślić, że uwzględnienie strat czasu, jako kryterium oceny wariantów konfiguracji łańcucha dostaw jest odpowiedzią na potrzeby dotyczące wzrostu efektywności łańcuchów dostaw. Zwłaszcza w aspekcie minimalizacji operacji niepodnoszących wartości dóbr materialnych.

Literatura

- [1] Ambroziak T, Jachimowski R, Pyza D, Szczepański E. Analysis of the traffic stream distribution in terms of identification of areas with the highest exhaust pollution. *Archives of Transport* 2015; 32(4): 7–16.
- [2] Ambroziak T, Jacyna M. Queueing theory approach to transport process dynamics Part 1. Dynamics of transport network connections. *Archives of Transport* 2002; 14(4): 5–20.
- [3] Ambroziak T, Jacyna M. Queueing theory approach to transport process dynamics part 2. Parameters of the transport process dynamics. *Archives of Transport* 2003; 15(1): 5–21.
- [4] Ambroziak T, Jacyna M, Wasiak M. The Logistic Services in a hierarchical distribution System. [in:] Goulias K G (ed.). *Transport Science and Technology* 2006: 383–394.
- [5] Barnes E, Dai J, Deng S, Down D, Goh M, Lau H C, Sharafali M. *On the Strategy of Shupply Hubs for Cost Reduction and Responsiveness*. White Paper. Singapore: The Logistics Institute – Asia Pacific, National University of Singapore, 2003.
- [6] Bertsimas D, Simchi-Levi D. A new generation of vehicle routing research: Robust algorithm, addressing uncertainty, *Operations Research* 1996; 44: 286–304.
- [7] Bramel J, Simchi-Levi D. *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [8] Chen A, Yang H, Lo H, Tang W H. A Capacity Related Reliability for Transportation Networks. *Journal of Advanced Transportation* 1999; 33(2): 183–200.
- [9] Chopra S, Sodhi M S. Reducing the Risk of Supply Chain Disruptions. *MIT Sloan Management Review* 2014; 55(3): 73.
- [10] Daganzo C F. *Logistics Systems Analysis*, New York: Springer Verlag, 1996.
- [11] Dandamudi S, Lu J-C. *Competition Driving Logistics Design with Continuous Approximation Methods*. Technical Report of the School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Tech, 2004.
- [12] Dugan J B, Bavuso B, Boyd M. Dynamic fault tree models for fault tolerant computer systems. *IEEE Trans. Reliability* 1992; 41: 363–377.
- [13] Dugan J B, Bavuso B, Boyd M. Fault trees and Markov models for reliability analysis of fault tolerant systems. *Reliability Engineering and System Safety* 1993; 39: 291–307.
- [14] Dukic G, Opetuk T. Warehouse layouts. [in:] Manzini R (ed.). *Warehousing in the Global Supply Chain. Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems* London: Springer, 2012.

- [15]Ecker J G, Kupferschmid M. Introduction to Operations Research, Florida: Krieger Publishing Company, 1988.
- [16]Fault Tree Analysis, International Technical Commission, IEC Standard, Publication 1025, 1990.
- [17]Fechner I (red.). Zarządzanie łańcuchem dostaw. Poznań: Wyższa Szkoła Logistyki, 2007.
- [18]Haj Shirmohammadi A. Programming maintenance and repair (Technical management in industry), 8th edn. Esfahan: Ghazal Publishers, 2002.
- [19]Izdebski M. The use of heuristic algorithms to optimize the transport issues on the example of municipal services companies. Archives of Transport 2014; 29(1): 27--36.
- [20]Izdebski M, Jacyna M. Wybrane aspekty zastosowania algorytmu genetycznego do rozwiązywania problemu przydziału zasobów do zadań w przedsiębiorstwie transportowym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 2013; 97: 183–194.
- [21]Jacyna Marianna, Izdebski Mariusz, Szczepański Emilian [i in.] : The task assignment of vehicles for a production company, w: Symmetry-Basel, vol. 11, nr 10, 2018, ss. 1-19
- [22]Jacyna M, Wasiak M, Lewczuk K, Kłodawski M. Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport. Archives of Transport 2015; 31(3): 23–35.
- [23]Jacyna-Gołda I. Evaluation of operational reliability of the supply chain in terms of the control and management of logistics processes. [in:] Nowakowski T et. all (ed.). Safety and Reliability: Methodology and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, 2015, 549-558.
- [24]Jacyna-Gołda I. Decision-making model for supporting supply chain efficiency evaluation. Archives of Transport 2015; 33(1): 17–31.
- [25]Jacyna-Gołda I, Izdebski M, Podvieszko A. Assessment of the efficiency of assignment of vehicles to tasks in supply chains: A case-study of a municipal company. Transport 2016; 31(4): 1–9.
- [26]Lee H L. The triple-A supply chain. Harvard Business Review 2004; 82(10): 102.
- [27]Magott J, Nowakowski T, Skrobanek P, Werbińska S. Analysis of possibilities of timing dependencies modelling – example of logistic support system. European Safety and Reliability Association Conference, ESREL, 2008. Valencia, Spain, Leiden: Taylor and Francis, 2008, 1055-10.
- [28]Mazuruk M, Rzepka M. Przegląd łańcucha dostaw według SCOR. Jak skutecznie kontrolować przepływ materiałów? EuroLogistics 2006; 3.

- [29] Nowakowski T. Models of uncertainty of operation and maintenance information. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2000; 35(2), 143–150.
- [30] Nowakowski T. Reliability model of combined transportation system. [in:] Spitzer C, Schmocker U, Dang V N (ed.). *Probabilistic Safety Assessment and Management*. London: Springer, 2004.
- [31] Powell W. A comparative review of alternative algorithms for the dynamic vehicle allocation problem. [in:] Golen B, Assad A (ed.). *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1988.
- [32] Powell W, Jaollet P, Odoni A, Stochastic and dynamic networks and routing. [in:] Ball M, Magnanti T, Monma C, Nemhauser G (ed.). *Network Routing; 8. Handbooks in Operations Research and Management Science*. North-Holland, Amsterdam, Netherlands: 1995.
- [33] Psaraftis H. Dynamic vehicle routing: Status and prospects. *Annals of Operational Research* 1995; 61(1): 143–164.
- [34] Rodrigues V S, Stantchev D, Potter A, Naim M, Whiteing A. Establishing a transport operation focused uncertainty model for the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 2008; 38(5-6): 388–411.
- [35] Sadgrove K. *The Complete Guide to Business: Risk Management*, 2nd ed. Aldershot: Gower Publishing Limited, 2005.
- [36] Sawicki P, Kiciński M, Fierek S. Selection of the most adequate trip-modelling tool for integrated transport planning system. *Archives of Transport* 2016; 37(1): 55–66.
- [37] Sohn S Y, Choi I S. Fuzzy QFD for supply chain management with reliability consideration. *Reliability Engineering & System Safety* 2001; 72(3): 327–334.
- [38] Spitter J M, Hurkens C A J, de Kok A G, Lenstra J K, Negenman E G. Linear programming models with planned lead times for Supply Chain Operations Planning. *European Journal of Operational Research* 2005; 163(3): 706–720.
- [39] Stephens S. Supply Chain Council & Supply Chain Operations Reference (SCOR). Model Overview. *Supply Chain Management an International Journal* 2001.
- [40] Szczepański E, Jacyna-Gołda I, Murawski J. Genetic algorithms based approach for transshipment HUB location in urban areas. *Archives of Transport* 2014; 31(3): 73–78.
- [41] Twaróg J. *Mierniki i wskaźniki logistyczne*. Poznań: Biblioteka Logistyka, 2005.
- [42] Wasiak M. A queuing theory approach to logistics systems modelling. *Archives of Transport* 2007; 19(1-2): 103–120.
- [43] Yu M, De Koster R. The impact of order batching and picking area zoning on order picking system performance. *European Journal of Operational Research* 2009.

- [44]Zhang Q S, Wang H Y, Liu H. 4-stage distribution network optimization of supply chain with grey demands. *Kybernetes* 2012; 41(5-6): 633–642.
- [45]Żak J, Jacyna-Gołda I. Using queue theory to analysis and evaluation of the logistics centre workload. *Archives of Transport* 2013; 25(1-2): 117–135.
- [46]Żochowska R. Selected issues in modelling of traffic flows in congested urban networks. *Archives of Transport* 2015; 29(1): 77–89.