Marek Karkula[1]
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Badania symulacyjne procesów transportowych realizowanych w obiektach logistycznych

1. WPROWADZENIE

W obiektach takich jak magazyny, centra dystrybucyjne, zakłady produkcyjne oraz terminale kontenerowe i przeładunkowe ważną rolę spełniają systemy i procesy transportu ładunków. Stanowią one element integracyjny dla innych podsystemów, a sprawna obsługa strumieni ładunków jest w dużym stopniu zależna od wydajności realizowanych operacji transportowych. Należą one do głównych składników wszystkich procesów i systemów logistycznych i wymagają przeprowadzenia szeregu czynności, takich jak planowanie, kontrolowanie, zarządzanie zarówno w jego obszarze zewnętrznym, jak i wewnętrznym. Transport jako system jest swojego rodzaju połączeniem między obszarami, np. produkcji, a strefami magazynowania czy konsumpcji oraz scala odseparowane od siebie podsystemy i zapewnia wymianę ładunków między tymi podsystemami. Działania systemu transportowego powinny być skoordynowane z innymi działaniami i procesami przedsiębiorstwa, takimi jak produkcja, magazynowanie, składowanie czy realizacja zamówień. Zasadniczym kryterium stosowanym w trakcie projektowania i przebudowywania systemów transportu wewnętrznego jest maksymalizacja sprawności obsługi procesów podstawowych. Określając zadania dla tych systemów istnieje konieczność uwzględnienia wiele parametrów i powiązań między nimi. Istotna jest świadomość podejmujących decyzje, że zmiana jednego z parametrów może mieć pozytywny, jak i niekorzystny wpływ. Nierzadko podejmowane decyzje wymagają uwzględnienia wiele czynników, a problem może zostać sformułowany jako zadanie optymalizacji wielokryterialnej.

W nowoczesnych systemach logistycznych i produkcyjnych coraz częściej wykorzystywane są zautomatyzowane systemy transportowe. Zadania transportowe w takich systemach mogą być realizowane na przykład przy użyciu pojazdów bezzałogowych typu AGV. Rozwiązania takie znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach: np. systemach magazynowych, elastycznych systemach produkcyjnych i transporcie kontenerów w terminalach kontenerowych. W wielu nowoczesnych systemach, w których mamy do czynienia z przepływem materiałów, rozwiązania bazujące na transporterach typu AGV wybierane są ze względu na przekonanie, że zwiększona zostanie wydajność i elastyczność systemu, a tym samym obniżone koszty działalności.

Podstawowym celem artykułu jest analiza wybranych aspektów modelowania systemów transportu wewnętrznego z wykorzystaniem metod stochastycznej symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami. Układ artykułu jest następujący. W rozdziale drugim zaprezentowano przegląd aktualnej literatury, obejmującej zagadnienia modelowania i optymalizacji operacji transportowych realizowanych w różnych obiektach logistycznych. W kolejnym rozdziale omówiono podstawowe składowe modeli systemów transportu i podstawowe problemy decyzyjne. Treścią czwartego rozdziału są elementy modeli symulacyjnych procesów i operacji transportowych. W tej części pracy zaprezentowano także przykład ilustrujący analizę operacji transportowych w centrum przeładunkowym cross-docking metodami symulacyjnymi.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA I OPTYMALIZACJI OPERACJI TRANSPORTOWYCH W LITERATURZE

Szeroką klasę problemów, do rozwiązania których podejmowane są decyzje logistyczne, stanowią systemy transportu wewnętrznego przedsiębiorstw i przepływu materiałów oraz procesy związane

[1] mkarkula@zarz.agh.edu.pl

z manipulacją ładunkami. Decyzje w tym obszarze dotyczą przepływu materiałów wewnątrz zakładu produkcyjnego lub obiektu logistycznego. Podstawowe decyzje odnoszą się do wyboru parametrów jednostek ładunkowych oraz sprzętu wykorzystywanego do manipulacji materiałami (przenośniki, taśmy rolkowe, ręczne wózki paletowe, wózki widłowe, systemy przenośników podwieszanych typu Power&Free, wózki bezzałogowe różnych typów). Problematyka związana z zagadnieniami transportu wewnętrznego, a dotycząca wymiarowania i projektowania układów i systemów transportowych poruszana jest przez wielu autorów, m.in. [3, 4, 11, 13, 14, 16, 19, 20, 23].

Ustalenie liczby wózków automatycznych typu AGV (ang. *automated guided vehicles*) w otwartym magazynie kontenerowym jest przedmiotem pracy Visa i innych [25]. Autorzy proponują model sieciowy oraz algorytm minimalnego przepływu w celu ustalenia optymalnej liczby wózków, które zapewnia obsługę założonego w systemie magazynowym obciążenia. W pracach Ambroziaka i Jacyny [1, 2] zaprezentowano zagadnienie określania parametrów charakteryzujących dynamikę procesu transportowego. Autorzy publikacji zastosowali aparat teorii masowej obsługi do wieloaspektowych analiz procesów transportowych. W pracy Devikara i innych [9] zaprezentowano metodykę modelowania i analizy złożonego systemu transportu podwieszanego typu Power&Free realizującego operacje transportowe w elastycznym systemie produkcyjnym. Badania symulacyjne na zbudowanych przeprowadzono w celu identyfikacji wąskich gardeł i określeniu oraz poprawieniu wydajności systemu transportowego. Analizy przeprowadzono przy założeniu szczytowego obciążenia zadaniami transportowymi.

Szeroką klasą obiektów, w których zagadnienia planowania, harmonogramowania i sterowania operacjami i zadaniami transportowymi stanowią istotny element podejmowanych decyzji są terminale przeładunkowe i centra typu cross-docking [4]. W pracy Legato i innych [21] zaprezentowano model pracy i harmonogramowania operacji suwnicy nabrzeżnej w morskim terminalu kontenerowym. Autorzy sformułowali założenia do modelu optymalizacyjnego wykorzystującego mieszane programowanie całkowitoliczbowe (MIP), a następnie wykorzystali notację czasowych sieci Petriego do budowy modelu symulacyjnego.

W obiektach typu cross-docking transport wewnętrzny może być realizowany ręcznie (np. za pomocą wózków paletowych) lub za pomocą systemu zautomatyzowanego, np. sieci przenośników lub transporterów AGV. Wybór sposobu transportu z reguły zależy od rodzaju ładunków, które są obsługiwane w terminalu. I tak do obsługi ładunków na paletach, najczęściej wykorzystywane są wózki widłowe. Z kolei rozwiązania wykorzystujące przenośniki stosowane są często przez operatorów realizujących przesyłki kurierskie, ekspresowe i paczkowe (KEP). Praktykowane jest także połączenie obu sposobów realizacji transportu [4]. W obiektach tego typu transport wewnętrzny stanowi podstawę efektywnej realizacji zadań i obsługi operacji przyjmowania i wydawania ładunków. Vahdani i Zandieh w pracy [24] zaproponowali pięć metaheurystyk do rozwiązywania problemu harmonogramowania zadań transportowych i minimalizacji czasów operacji transportowych w centrum przeładunkowym: algorytm genetyczny (GA – *genethic algorithm*), przeszukiwanie z listą ruchów zabronionych (TS – *tabu search*), symulowane wyżarzanie (SA – *simulated annealing*), algorytm elektromagnetyczny (EMA – *electromagnetism-like algorithm*) oraz przeszukiwanie zmiennego sąsiedztwa (VNS – *variable neighbourhood search*).

Dokonując analizy literatury można zauważyć, że wiele proponowanych rozwiązań dotyczy określonych zagadnień i często uwzględnia jedno kryterium optymalizacji sformułowanych zadań.

3. MODELOWANIE SYSTEMÓW I PROCESÓW TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

W złożonych systemach transportu wewnętrznego jako podstawowe elementy struktury można wyróżnić:

- miejsca, w których ładunki są pobierane na środek transport,
- punkty ich przeładunku, wyładunku,
- jeden lub więcej środek transportu,
- ścieżki transportowe,
- miejsca, w których realizowana jest obsługa ładunków lub środków transportu (np. miejsca ładowania akumulatora).

Bardzo ważnym elementem jest także system zarządzania transportem umożliwiający sterowanie pojazdami. Zadaniem takiego systemu jest podjęcie decyzji, kiedy, gdzie i w jaki sposób pojazdy powinny być rozdysponowane w celu realizacji zadań, w tym także decyzji dotyczących tras, po których pojazdy będą się poruszały. W przypadku gdy wszystkie zadania są znane przed rozpoczęciem okresu planowania, problem planowania ma **charakter statyczny** i może być rozwiązany bez znajomości przyszłych stanów systemu. Jednak w praktyce dokładne informacje na temat miejsc pracy (zadań) pojazdu nie są zwykle znane na etapie projektowania planu. Zatem opracowanie harmonogramu zadań transportowych w takim trybie jest praktycznie niemożliwe. W takim przypadku często stosuje się podejście znane w literaturze jako **harmonogramowanie dynamiczne**, które polega na przydzielaniu zadań transportowych do zasobów (środków transportu) przy zastosowaniu różnych reguł priorytetów zadań i przypisywania do nich pojazdów.

Podczas budowy modelu systemu transportowego brany jest często jego sieciowy charakter. Sieci transportowe opisywane są najczęściej za pomocą grafów skierowanych [3, 16, 19]. Graf skierowany *G* można przedstawić jako dwójkę:

$$G(V, E) \tag{1}$$

składającą się z niepustego zbioru *V* węzłów, $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ oraz zbioru uporządkowanych par wierzchołków zwanych łukami $E=\{e_1, e_2 \ldots, e_m\}$ będącego podzbiorem zbioru $V, E \subseteq V \times V$. Pierwszy i drugi element uporządkowanej pary (v_i, v_j) nazywany jest odpowiednio początkiem i końcem łuku.

Przepływ materiałów w takiej sieci jest często reprezentowany formalnie jako macierz sąsiedztwa *A(G)*. Elementy macierzy *A(G)* są definiowane jako:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli łuk } \langle i, j \rangle \text{ istnieje} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{2}$$

Z macierzą sąsiedztwa *A(G)* koresponduje macierz odległości *D(G)*, której elementy są definiowane jako:

$$d_{ij} = \begin{cases} d(i,j), & \text{jezeli droga z } i \text{ do } j \text{ istnieje} \\ \infty, & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{3}$$

Wyrażenie $d(i,j)$ oznacza odległość wyznaczoną dla zadania transportowego z punktu *i* do punktu *j*. Dla *i=j* odległość $d(i,j) = 0$, w przypadku gdy między wierzchołkami jest brak łuku, odległość oznaczana jest symbolem ∞ (nieskończoność).

Jednym z podstawowych problemów dla zdefiniowanej zależnościami (1–3) struktury sieci transportowej jest określenie minimalnej drogi między dwoma węzłami w sieci. Węzły takie oznaczane są jako źródło i spływ, co oznacza miejsce pobrania ładunku do transportu (źródło) oraz miejsce docelowe transportu (spływ). W systemach logistycznych problem wyznaczania najkrótszej drogi (ścieżki) pojawia się w zastosowaniach praktycznych bezpośrednio i jako cząstkowe zadanie bardziej złożonych zagadnień. Istnieją trzy podstawowe warianty problemu: 1) wyznaczenie najkrótszej ścieżki między dwoma danymi wierzchołkami; 2) znalezienie najkrótszych ścieżek od określonego wierzchołka (źródła), do wszystkich innych wierzchołków grafu oraz 3) wyznaczenie najkrótszych ścieżek między dowolnymi wierzchołkami grafu. Do wyznaczenia najkrótszej drogi wykorzystuje się szeroko opisane w literaturze algorytmy, m.in. Dijkstry, Bellmana-Forda, heurystyki przeszukiwania A^*, Floyda-Warshalla i inne [5, 6, 10].

Skuteczna analiza i planowanie pracy systemów transportu wewnętrznego, wymaga zastosowania odpowiednich rozwiązań i narzędzi. W zależności od skali problemu, jak również od złożoności badanego systemu, badacze zajmujący się powyższą problematyką mają do dyspozycji różne klasy metod: metody analityczne, metody identyfikacji i optymalizacji bazujące na algorytmach badań operacyjnych, a także metody symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami (ang. *discrete event simulation* – DES), które umożliwiają analizę dynamicznego zachowania się systemów i szczegółowe studium parametrów czasowych związanych z różnymi stanami. W przypadku stosowania metod symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami można przeprowadzać dokładne badania i eksperymenty na modelach uwzględniajacych szczegółowe, elementarne operacje i informacje o procesach transportowych.

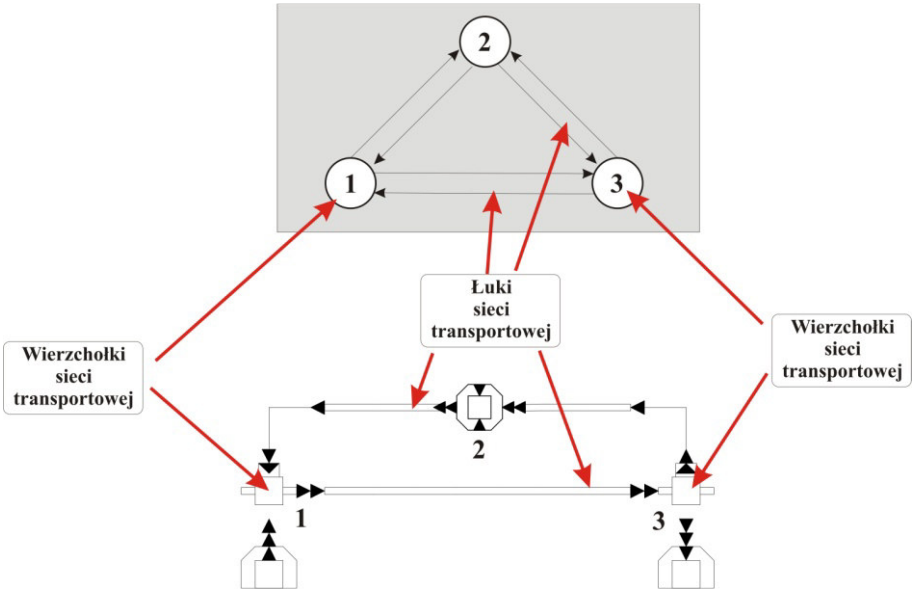
4. MODELE SYMULACYJNE WYBRANYCH OPERACJI TRANSPORTOWYCH

4.1. Środowisko symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami

Metody tej ostatniej klasy wykorzystywane są w nowoczesnych pakietach symulacyjnych, do których należy pakiet DOSIMIS-3 [18, 19]. Jest to graficzny, interaktywny pakiet służący do modelowania między innymi systemów transportu wewnętrznego. Dzięki zastosowaniu standardowych modułów jak źródła, spływy, stacje obróbcze, pojazdy, bufory, czy przenośniki użytkownik w stosunkowo prosty sposób może odwzorować elementy systemu transportowego. Dostępne moduły (odwzorowujące stany awaryjne i przerwy w pracy) umożliwiają analizę powstających podczas pracy zatorów, zakłóceń i przerw w przepływie materiałów, analizę ich przyczyn i miejsc. Modelowaniu w środowisku DOSIMIS-3 mogą podlegać też procesy załadunku i wyładunku ładunków na i z pojazdów transportowych, jak też procesy przeładunkowe i przepakowywania. Funkcjonalność budowanych modeli może zostać rozszerzona za pomocą tzw. tabel decyzyjnych [18]. W tabelach decyzyjnych definiuje się warunki oraz opisuje w jakich przypadkach zostaną one wykonane. Tabela zwiera także instrukcje dotyczące tego jak ma się zachować dany element modelu, gdy warunek zostanie spełniony lub nie. Mechanizmy te są bardzo pomocne przy testowaniu złożonych algorytmów sterowania przebiegiem obiektów mobilnych i przepływów informacji i z reguły są wykorzystywane wtedy gdy nie można zrealizować założonego przepływu obiektów czy zachowania się modelu za pomocą standardowej parametryzacji i strategii.

4.2. Identyfikacja elementów procesów i operacji transportowych w modelach symulacji dyskretnej

Dane wejściowe wykorzystywane w modelach operacji i procesów transportu wewnętrznego obejmują odległości pomiędzy wierzchołkami sieci, dane dotyczące transportowanych ładunków (ilości i miejsca wydania i dostarczenia, dane czasowe), dane pojazdów (typ, pojemność, prędkość itp.) oraz dane dodatkowe (np. reguły parkowania dostępnych pojazdów czy zasady zarządzania energią lub zasady polityki remontowej). W modelu symulacyjnym zbudowanym w wykorzystywanym symulatorze odpowiednikiem reprezentacji grafowej jest reprezentacja sieci transportowej z wykorzystaniem predefiniowanych elementów, które odwzorowują funkcjonalność i logikę rzeczywistych elementów infrastruktury transportu wewnętrznego. Na rysunku 1 zaprezentowano relacje elementów modelu matematycznego w postaci grafu z modelem symulacyjnym zbudowanym w zintegrowanym środowisku modelowania.



Rys. 1. Ilustracja powiązań składowych modeli systemu transportowego: modelu grafowego i modelu symulacyjnego zbudowanego w środowisku symulatora

Źródło: opracowanie własne.

Do podstawowych elementów modelu symulacyjnego wykorzystywanych do odwzorowania systemów transportowych i realizowanych w nich procesów należą:

- ścieżka transportowa (ang. *track*) – odpowiada łukom sieci reprezentowanej przez graf, odwzorowuje drogę między dwoma wierzchołkami;
- stacja załadowcza (ang. *loading station*) – reprezentuje wierzchołek sieci będący miejscem pobrania ładunku do transportu;
- stacja rozładowcza (ang. *unloading station*) –wierzchołek sieci, do którego transportowany jest ładunek;
- stacja obsługi z funkcją transportową (ang. *workstation with transport*) – element sieci transportowej stanowiący jej wierzchołek, w którym jest możliwa obsługa środka transportu lub obsługa ładunku przewożonego przez środek transportu bez jego rozładunku lub przeładunku;
- moduł sterowania akumulatorem (ang. *battery control module*) – element przepływu informacji, w systemach zautomatyzowanych umożliwia monitorowanie stanu zużycia akumulatora i określenie reguł jego doładowania;
- skrzyżowanie, węzeł złożony (ang. *crossing*) – moduł wykorzystywany jest do odwzorowania miejsc w systemie, w których przecinają się strumienie przepływu obiektów;
- przenośnik transportowy (ang. *conveyor*) – element odwzorowujący różne typy przenośników transportowych o działaniu ciągłym jak i przerywanym.

Ścieżka transportowa (ang. *track*) jest elementem odpowiadającym drogom w rzeczywistej sieci transportowej. W elementach tego typu mogą zostać wygenerowane pojazdy, których zadaniem jest przemieszczanie ładunków. Pojazdy traktowane są jako obiekty przepływające pomiędzy kolejnymi elementami systemu. Chcąc rozróżnić różne typy pojazdów należy zdefiniować dla każdego z nich określony typ, poprzez przypisanie dla każdego z pojazdów określonej liczby całkowitej. Do charakterystycznych parametrów umożliwiających odwzorowanie procesu transportu wzdłuż drogi są jej długość s_t, prędkość transportu v_t, przyspieszenie a_t.

Kolejnym istotnym składnikiem modeli procesów transportowych jest element typu węzeł złożony (ang. *complex node, crossing*) służy do przedstawienia węzłów, w których następuje zarówno łączenie, jak i rozdział strumieni transportowanych ładunków. Elementy takie mogą odwzorowywać takim składniki rzeczywistych procesów, jak skrzyżowania w systemach transportowych, węzły przyjmowania i rozdziału ładunków. Element przyjmuje *n* strumieni wejściowych z ustaloną strategią wyboru pierwszeństwa wejścia (np. FIFO, maksymalna zajętość poprzednika, priorytet wejście, itp.). Strumień wejściowy może być rozdzielony na *m* strumieni wyjściowych, a bilans przepływu strumieni wejściowych i wyjściowych będzie miał postać: $\sum_{i=1}^{n} \lambda we_i = \sum_{j=1}^{m} \lambda wy_j\,,\ \ n, m \in \mathbb{N}$.

Parametry *n* oraz *m* określają także liczbę wejść i wyjść elementu typu skrzyżowanie. Pojemność elementu C_E jest równa jeden, co oznacza, że w określonym czasie w węźle może przebywać tylko jeden obiekt (np. pojazd lub wózek). Istotnym parametrem modułu typu skrzyżowanie jest również macierz odległości między poszczególnymi wejściami i wyjściami opisana formułą (3). Algorytm przejścia obiektów przez element typu węzeł złożony ma następujący przebieg. W pierwszym momencie podejmowana jest decyzja o wyborze wejścia, z którego przekazany zostanie obiekt. Po przyjęciu obiektu na podstawie ustalonej strategii dystrybucji określany jest numer wyjścia, do którego zostanie skierowany. Jeśli możliwe jest przekazanie obiektu do wybranego wyjścia, następuje transport obiektu. Czas operacji transportu $T_{t_{ij}}$ zależy od zdefiniowanej prędkości transportu v_t oraz od odległości s_{ij} między *i*-tym wejściem, a *j*-tym wyjściem: $T_{t_{ij}} = \frac{s_{ij}}{v_t}$.

W praktyce może być również konieczne uwzględnienie czasu transportu pionowego T_{t_V} – istnieje wiele rozwiązań, w których punkt wejściowy i punkt wyjściowy znajdują się na różnych poziomach i oprócz transportu poziomego konieczny jest także transport pionowy, np. z wykorzystaniem windy.

Należy wtedy uwzględnić dodatkową drogę s_{ijV}, którą należy pokonać w trakcie transportu pionowego, z inną z reguły prędkością v_{tV}. W takim przypadku czas transportu jednostki mobilnej z wejścia *i* do wyjścia *j* będzie wynosił: $T_{t_{ij}} = \frac{s_{ij}}{v_t} + \frac{s_{ijV}}{v_{t_V}} + T_{pos}$ gdzie T_{pos} jest czasem pozycjonowania urządzenia transportu pionowego i składnik ten często ma istotny wpływ na całkowity czas transportu.

W celu wyszczególnienia różnych typów pojazdów w modelu należy przypisać odpowiednim obiektom typ – polega to na przyporządkowaniu liczby całkowitej dla określonego rodzaju pojazdów. Przewożonym

przez pojazdy ładunkiem jest obiekt pobierany w stacji załadowczej, natomiast zlecenie transportowe opisane jest przez dwa parametry:

- pierwszy określa miejsce (adres stacji załadowczej), z którego ładunek ma być pobrany – w modelu symulacyjnym określany także jako cel podstawowy lub pierwszorzędny (ang. *primary destination*);
- drugi wskazuje na miejsce (adres stacji rozładowczej) dostarczenia ładunku – zdefiniowany również jako cel drugorzędny (ang. *secondary destination*).

Wszystkie elementy (czyli wierzchołki sieci transportowej, np. stacje załadowcze, rozładowcze), przez które mogą być kierowane pojazdy, mają przypisany specjalny atrybut określający adres (miejsce) stacji transportowej. Dla elementów tych wprowadza się parametry dotyczące m.in. czasów załadunku i rozładunku, liczby i typów ładunków.

Ważnym elementem podczas konstrukcji modelu symulacyjnego jest ustalenie **zasad sterowania** pojazdami i zleceniami transportowymi. Do zasad tych należy wyznaczenie tras pojazdów i odbywa się to przez przypisanie im określonych celów, którymi są stacje rozładunkowe lub stacje obsługi. Podstawowym zadaniem planowania transportu jest przypisanie **zlecenia transportowego** do dostępnej **puli pojazdów**. Sposób przypisywania zleceń może być realizowany w sposób statyczny lub dynamiczny, wynikający z aktualnych zdarzeń i stanów w modelu. Kolejnym praktycznym problemem jest zasięg zasad sterowania podsystemem transportowym. Można tutaj rozróżnić dwa przypadki: 1) globalne sterowanie transportem – umożliwia zarządzanie wszystkimi pojazdami zaalokowanymi w systemie; 2) lokalne sterowanie transportem – często istnieje potrzeba stosowania autonomicznych zasad dla pewnych fragmentów systemu transportowego realizującego określone zadania. W drugim przypadku lokalnymi zasadami objęte są zarówno pula pojazdów, jak i stacje załadunkowe i rozładunkowe oraz ścieżki transportowe.

Do oceny systemów transportu wewnętrznego wykorzystywane są przede wszystkim wskaźniki informujące o efektywności wykorzystania środków transportu oraz udziale czasu poszczególnych stanów, w których może znajdować się środek transportu do całkowitego czasu symulacji (czasu pracy modelowanego systemu). Do stanów opisujących środek transportu można zaliczyć m.in.: transport z ładunkiem, awaria, ładowanie baterii, transport pusty, załadunek, rozładunek, bezczynność, jazda do miejsca zlecenia transportowego, itp.

4.3. Przykład – model procesów transportowych w systemie przeładunkowym typu cross-docking

W niniejszym podrozdziale rozpatrywany jest model systemu przeładunkowego typu cross-docking. Badane centrum przeładunkowe składa się z trzech doków wejściowych oraz czterech wyjściowych. Transporty ładunków do centrum przybywają do każdego z trzech doków przyjmujących, a strumień ich przybyć jest opisany losowym czasem między przybyciem o rozkładzie normalnym NORM(35, 10) minut. Każdy transport składa się z losowej liczby paletowych jednostek ładunkowych (*jłp*) wyznaczanej dla każdego transportu określonej rozkładem jednostajnym UNIF (15, 33) *jłp*. Do analizy przyjęto założenie, że średnie czasy rozładunku i/lub załadunku (z uwzględnieniem drogi przejazdu przez środek transportu zewnętrznego) pojedynczej jednostki ładunkowej wynosi 20 sekund, a procesy przeładunku między dokami realizowane są bez fazy składowania. Ponadto założono, że każda *jłp* może trafić z równym prawdopodobieństwem do jednego z czterech doków wyjściowych (w przypadku rzeczywistego harmonogramu dok docelowy jest określony na liście przeładunkowej).

Tabela 1. Dane dotyczące zadania

Czas między przybyciem transportu do każdego z trzech doków wejściowych	NORM (35, 10) [min.]
Liczba paletowych jednostek ładunkowych w transporcie	UNIF (15, 33) [jłp]
Czas rozładunku, czas załadunku z i na środek transportu zewnętrznego	20 [s]
Liczba wózków	3 [szt.]
Prędkość wózków	12 [km/h]
Odległość pomiędzy dowolnym dokiem wejściowym a wyjściowym	35 [m]
Odległość pomiędzy sąsiadującymi dokami wejściowymi i wyjściowymi	7,5 [m]

Źródło: Opracowanie własne.

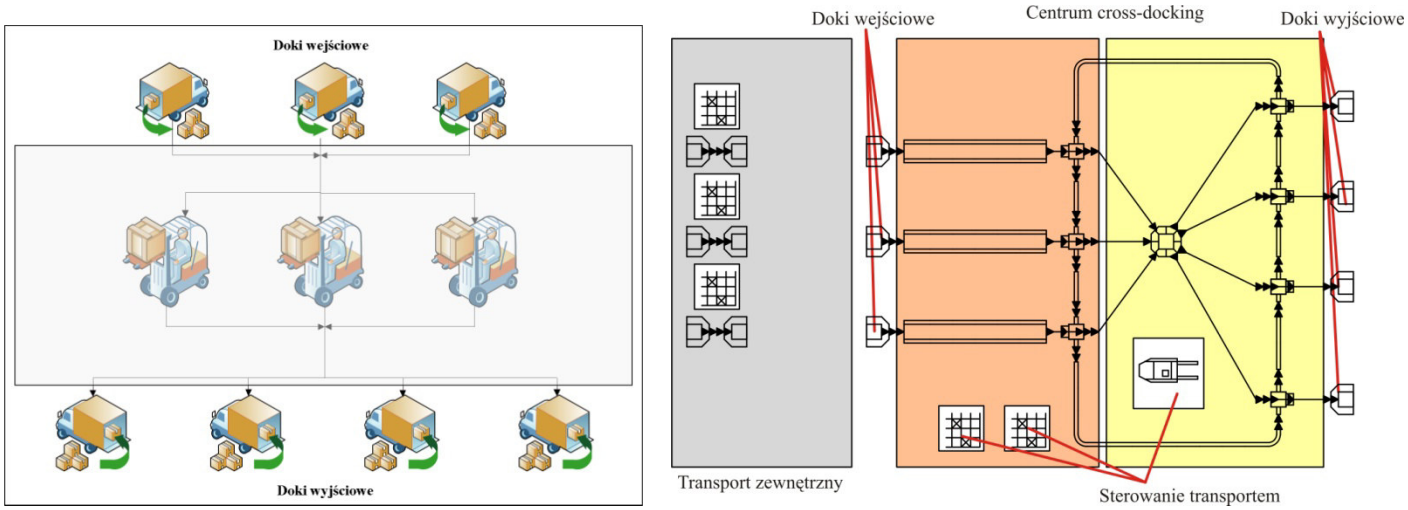
Transport między dokami wejściowymi a wyjściowymi odbywa się przy pomocy trzech wózków widłowych, których średnia prędkość transportu wynosi 12 km/h. Odległości pomiędzy dowolnym dokiem

wejściowym, a wyjściowym wynoszą 35 m, natomiast odległości między sąsiadującymi dokami wejściowymi i wyjściowymi są równe 7,5 m.

W ramach badań zbudowano model symulacyjny omówionego powyżej systemu i dokonano analizy kilku wariantów sterowania ruchem środków transportu wewnątrz centrum przeładunkowego:

- wariant 1) – wózki transportowe pozostają w miejscu ostatniego rozładunku oczekując na kolejne zlecenie transportowe; po jego pojawieniu się, przemieszczają się do doku wejściowego, z którego napłynęło zgłoszenie;
- wariant 2) – wolne wózki wysyłane są do środkowego doku wejściowego (oznaczonego jako dok 2) i tam oczekują na zlecenia transportowe.
- wariant 3) – wózek z góry jest przypisany do jednego z doków wejściowych i zostaje do niego skierowany w przypadku gdy jest wolny.

Celem badań symulacyjnych było porównanie trzech powyższych wariantów sterowania pojazdami, wyznaczenie statystyk czasów przebywania *jłp* w systemie oraz przeprowadzenie analizy wykorzystania doków. Na rysunku 2 pokazano szkic omawianego centrum przeładunkowego oraz fragment modelu symulacyjnego zbudowanego w środowisku symulacyjnym. Model zbudowano w środowisku symulacyjny z wykorzystaniem elementów, których funkcjonalność została przedstawiona w podrozdziale 4.2, natomiast algorytmy realizujące założone warianty sterowania ruchem wózków zaimplementowano stosując tabele decyzyjne.



a) b)

Rys. 2. Schemat magazynu cross-docking (a) oraz fragment modelu transportu wewnętrznego w zrealizowanego w pakiecie symulacyjnym (b)

Źródło: Opracowanie własne.

Generowanie losowej liczby ładunków dla transportu zewnętrznego zrealizowano w tabeli decyzyjnej wyzwalanej na zdarzenie przybycia środka transportu do centrum:

- **zmienna lokalna**: `ile_palet:=dice(15,33)` – funkcja `dice` inicjalizuje generator liczb pseudolosowych i zwraca liczbę z przedziału (15, 33);
- **warunek**: `act_module.exiting=1` – zmienna `act_module` odnosi się do doku wejściowego, w którym aktualnie przybył pojazd zewnętrzny;
- **akcja**: `for(i:=1;i<=ile_palet;i:=i+1)module(1).gen_object(1)` – dla transportu przybyłego do rozpatrywanego doku generowana jest lista obiektów odpowiadających ładunkom *jłp* w liczbie równej parametrowi `ile_palet`.

W przypadku określenia doku docelowego dla ładunku algorytm zaimplementowany w kolejnych tabelach decyzyjnych ma postać:

- **lista warunków**: `act_module.f_obj.f_load.type=1` – wózek z ładunkiem
  `act_module.exiting=1` – wózek odjeżdża z aktualnego doku;

– **akcja**: `act_module.f_obj.new_destination(dice(4,7))` – przypisanie do zlecenia transportowego realizowanego przez wózek losowego nr doku wyjściowego (o numerach od 4 do 7).

Z kolei algorytm dla trzeciej reguły dyspozycji pojazdów po rozładunku został zrealizowany w następujący sposób:

– **lista warunków**: `act_module.f_load.type=0` – pusty wózek
`act_module.exiting=1` – wózek odjeżdża z aktualnego doku
`act_module.f_obj.agv_no=1` – identyfikacja numeru wózka (1)
– **akcja**: `act_module.f_obj.new_destination(1)` – wózek jest skierowany do doku wejściowego o numerze 1.

Do oceny wyników symulacji wykorzystywane są podstawowe charakterystyki określające funkcjonowanie systemu transportowego. Należą do nich m.in. czas realizacji zlecenia transportowego, czas trwania transportu (procesu przewozu) oraz liczba obsłużonych zleceń transportowych. W analizach czasowych cykli transportowych rozróżniane są czasy transportu oraz czasy realizacji zlecenia transportowego, które nie są wielkościami tożsamymi. Czas transportu liczony jest od momentu przydzielenia do chwili zdeponowania go w stacji rozładowczej, natomiast czas realizacji zlecenia transportowego obejmuje czas od momentu pojawiania się zlecenia na liście do chwili, kiedy z tej listy zostanie zwolnione. Wyniki symulacji dotyczące statystyki czasów cykli transportowych dla poszczególnych wariantów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Czasy cykli transportowych przeładunku *jłp* w centrum – wyniki eksperymentów symulacyjnych

	Wózek	Czas maks. [s]	Czas śr. [s]	Czas min. [s]
Wariant1	1	616,39	265,82	99,59
	2	572,79	268,37	98,4
	3	604,6	263,47	112,59
Wariant2	1	420,6	165,87	39,59
	2	476,39	168,68	38,4
	3	504,6	163,8	76,8
Wariant3	1	423,6	165,72	39,59
	2	476,39	168,08	38,4
	3	507,6	163,84	72,59

Źródło: Opracowanie własne.

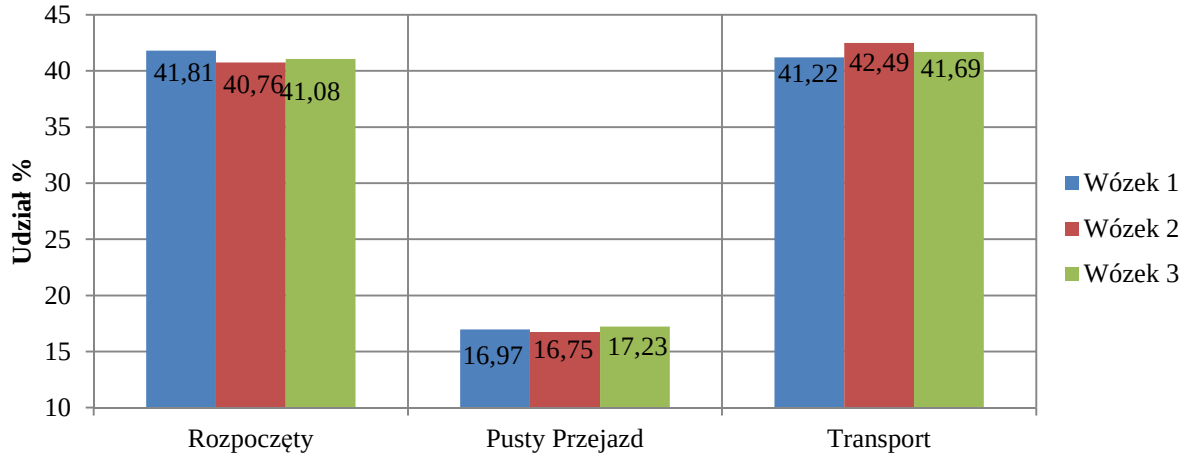
W tabeli 2 można zauważyć, że warianty 2 i 3 nie różnią się między sobą znacznie biorąc pod uwagę czasy cykli transportowych dla poszczególnych zleceń i wózków. Znacznie dłuższe czasy cykli otrzymano w przypadku wariantu 1 – wynika to z przyjętej strategii rozdzielenia wózków po rozładunku, które zostają przy dokach wyjściowych. Działaniom związanym z przydzielaniem zleceń transportowych, pojazdów i ich obsługą przypisane są następujące statusy:

– rozpoczęty – obejmuje czas od momentu pojawienia się zlecenia na liście do chwili przypisania pojazdu do jego realizacji;
– pusty przejazd – oznacza czas od chwili przydzielenia pojazdu do obsługi zlecenia do momentu podjęcia ładunku w stacji załadowczej;
– transport – czas przewozu ładunku od stacji załadowczej do stacji rozładowczej.

Na rysunku 3 zaprezentowano diagram statusów realizacji zleceń transportowych dla wariantu 1 przeprowadzonych symulacji.

Na poniższym diagramie widać, że każdy z trzech wózków przez ponad 16% czasu trwania symulacji spędził na jeździe bez ładunku, z kolei widać dosyć długie czasy oczekiwania na przypisanie zleceń do pojazdów (status rozpoczęty), co powoduje powstanie długiej kolejki zleceń transportowych. Efektem szczegółowych analiz odnoszących się cykli realizacji zleceń transportowych oraz przydziału pojazdów do obsługi zleceń transportowych dla rozpatrywanych powinna być poprawa jakości charakterystyk

funkcjonowania analizowanego sytemu transportowego. Wnioski z takich analiz są cennym elementem wspomagania decyzji w obiektach logistycznych.



Rys. 3. Diagram udziału statusów realizacji zleceń transportowych dla wariantu 1 eksperymentów symulacyjnych modelu terminalu cross-docking

Źródło: Opracowanie własne.

5. PODSUMOWANIE

Chcąc zwiększyć efektywność procesów obsługi ładunków w zakładach przemysłowych lub w obiektach logistycznych takich jak centra dystrybucyjne, magazyny, terminale przeładunkowe istnieje potrzeba stosowania nowoczesnych i wydajnych systemów transportu wewnętrznego. Biorąc pod uwagę konieczność elastycznego dostosowania do wymagań zewnętrznych i wewnętrznych klientów wyzwaniem staje się sterowanie i zarządzanie takimi systemami. Podejmujący decyzje w tym zakresie muszą często wyznaczyć optymalne ścieżki transportu, opracować reguły przydzielania zleceń transportowych do dostępnych środków transportu, a jednocześnie sterować ruchem pojazdów tak, aby nie dopuścić do powstawania konfliktów i zatorów transportowych. Skutecznymi metodami umożliwiającymi racjonalne podejmowanie decyzji dla takich wielokryterialnych zagadnień są zaprezentowane narzędzia symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami. W ramach dalszych badań planowane jest poddanie analizie innych typów systemów transportu wewnętrznego, m.in. suwnic, systemów obsługi procesów magazynowych.

Streszczenie

Transport stanowi ważny element systemów logistycznych. Niewłaściwe zarządzanie operacjami transportowymi może przyczynić się do niskiego stopnia wykorzystania środków transportowych i wysokich kosztów transportu, a także do powstawania niepotrzebnie wysokich stanów zapasów w każdym z miejsc magazynowania, jak również do wydłużenia czasu realizacji zlecenia i niepełnego wykorzystania zdolności przedsiębiorstwa. Bardzo ważne jest zatem odpowiednie zwymiarowanie, zaplanowanie systemu transportowego oraz realizowanych operacji transportowych tak, aby umożliwić dostarczenie określonych ładunków we właściwym czasie i ilości w odpowiednie miejsca systemu. W artykule zaprezentowano metody modelowania operacji transportowych z uwzględnieniem różnych kryteriów bazujące na symulacji dyskretnej sterowanej zdarzeniami. Przedstawiono przypadek modelowania operacji transportowych w centrum przeładunkowym typu cross-docking.

Słowa kluczowe: transport, system logistyczny, operacja, symulacja, optymalizacja

Simulation studies of transport processes in logistics facilities

Abstract

The key element in a logistics systems is transportation subsystem. Poor management of transport operations may contribute to the low utilization of vehicles and high transport costs, as well as the formation of unnecessarily high stock levels at each site storage, as well as to extend the term of the order and under-utilization of capacity of the company. Therefore, it is important to apply suitable dimensioning, planning and control of the transport system and transport operations in such a way to allow supplying of the right goods at the right time and at the right place of the system. The paper presents a modeling issues to optimize transport

operations according to various criteria based on discrete event simulation. A case of modeling of transport operations at the cross-docking terminal is presented.

Key words: transport, logistics system, transport operation, simulation, optimization.

LITERATURA

[1] Ambroziak T., Jacyna M.: Queueing theory approach to transport process dynamics. Part 1. Dynamics of transport network connections, Archives of Transport, 14(4), 2002.
[2] Ambroziak T., Jacyna, M.: Queueing theory approach to transport process dynamics. Part 2. Parameters of the transport process dynamics, Archives of Transport, 15(1), 2003.
[3] Arnold D., Furmans K.: Materialfluss in Logistiksystemen, VDI Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
[4] van Belle J., Valckenaers P., Cattrysse D.: Cross-docking: State of the art, Omega, 2012, 40(6), s. 827–846
[5] Chalfen, M. Kamińska, J.: Algorytm Dijkstry w modelowaniu samochodowego ruchu miejskiego, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 2013, 14(3), s. 1885–1893
[6] Cherkassky B.V., Goldberg A.V., Radzik T.: Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation, Mathematical Programming, 1996, 73(2), s. 129–174
[7] Clausen U., Dabidian P., Diekmann D., Goedicke I., Pöting M.: Analysis of assignment rules in a manually operated distribution warehouse, [w:] Pasupathy R., Kim S.-H., Tolk A., Hill R., and Kuhl M. E., (eds), Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, s. 3430–3439.
[8] Degano C., Di Febbraro A.: Modelling automated material handling in intermodal terminals, [w:] Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on , vol. 2, no. 1, s. 1023–1028, 2001
[9] Devikar A., Garge N., Welekar R., Vasudevan K., Williams E.: Evaluating the performance of a complex power and free conveyor system in a flexible manufacturing environment, [w:] Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC), 5–8 Dec. 2010, s. 1574–1583
[10] Dijkstra E. W.: A note on two problems in connection with graphs, Numerische Mathematik, 1959, 1, s. 269–271.
[11] Fijałkowski J.: Transport wewnętrzny w systemach logistycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
[12] Gawrilow E., Köhler E., Möhring, R. H., Stenzel B.: Dynamic Routing of Automated Guided Vehicles in Real-time, [w:] Krebs H.-J., Jäger, W. (eds): Mathematics – Key Technology for the future, Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 165–177.
[13] Groover M. P.: Automation, production systems and computer-integrated manufacturing. 2nd edition, Prentice-Hall, New Jersey 2001.
[14] Gudehus T., Kotzab H.: Comprehensive Logistics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
[15] Heinrich M.: Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, 6., vollst. überarb. Aufl., Vieweg 2006.
[16] Jacyna M.: Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
[17] Jaoua A., Riopel D., Gamache M.: A simulation framework for real-time fleet management in internal transport systems, Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 21(1), s. 78–90.
[18] Karkula M.: Application of decision tables in discrete event simulation models, [w:] Wybrane Zagadnienia Logistyki Stosowanej, Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 2008, s. 252–260.
[19] Karkula M.: Modelowanie i symulacja procesów logistycznych, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
[20] Le-Anh T., De Koster M.B.M.: A review of design and control of automated guided vehicle systems, European Journal of Operational Research, 2006, 171(1), 2006, s. 1–23
[21] Legato P., Trunfio R., Meisel F.: Modeling and solving rich quay crane scheduling problems, Computers & Operations Research, 2012, 39(9), s. 2063–2078
[22] Qiu L., Hsu W.-J., Huang S.-Y., Wang H.: Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey, International Journal of Production Research, 2002, 40(3), s. 745–760.
[23] Schmidt F.: Komplexe Fahrerlose Transportsysteme, Verlag TUV Rheinland, 1989.
[24] Tyński A.: Zagadnienia szeregowania zadań z uwzględnieniem transportu: Modele, własności i algorytmy, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska 2006.
[25] Vahdani B., Zandieh M.: Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust meta-heuristics, Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(1) , s. 12–24,
[26] Vis I., de Koster R., Roodbergen K., Peeters, L.: Determination of the number of AGVs required at a semi-automated container terminal, Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(4), s. 409–417.