

Marek Karkula
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
Wydział Zarządzania

ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW TRANSPORTOWYCH OBSŁUGI MAGAZYNU METODAMI SYMULACYJNYMI

Streszczenie: W pracy przedstawiono model symulacyjny układnicy regałowej wykorzystywanej jako środek transportu wewnętrznego w systemach magazynowych. Model dynamiczny układnicy został zbudowany w środowisku symulacyjnym DOSMIS-3. Zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych oraz charakterystyki czasowe dla różnych trajektorii ruchu układnicy.

Słowa kluczowe: transport wewnętrzny, układnica regałowa, modelowanie, symulacja

1. WPROWADZENIE

W związku z rosnącą intensywnością strumieni materiałów, krótszym czasem życia produktów, zmieniającymi się listami asortymentowymi, zmniejszającymi się jednostkami ładunkowymi oraz koniecznością redukcji stanów magazynowych systematycznie rośnie liczba magazynów i centrów logistycznych, w których zastosowano rozwiązania zautomatyzowane. Centra logistyczne i magazyny są kluczowym aspektem nowoczesnych łańcuchów dostaw i mogą istotnie przyczynić się do sukcesu lub niepowodzenia dzisiejszych przedsiębiorstw.

Jednym z ważnych elementów systemów magazynowych jest transport wewnętrzny. Niewłaściwe zarządzanie transportem przyczynia się do powstawania niskiego stopnia wykorzystania czasu pracy środków transportowych i wysokich kosztów transportu. Jest również czynnikiem nieefektywnego wykorzystania stanowisk technologicznych, powstawania niepotrzebnie wysokich stanów zapasów w każdym z miejsc magazynowania, a także wydłużenia czasu realizacji zlecenia i niepełnego wykorzystania zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa. Bardzo ważne jest zatem odpowiednie zwymiarowanie, zaplanowanie systemu transportu wewnętrznego tak, aby umożliwić

dostarczenie określonych materiałów, półwyrobów lub wyrobów gotowych we właściwym czasie i ilości w odpowiednie miejsca systemu.

W omawianych magazynach, coraz częściej wykorzystywanymi urządzeniami transportowymi wspomagającymi procesy magazynowe są tzw. *układnice regałowe*, bądź magazynowe.

W fazie planowania i analiz związanych z operacjami transportowymi w systemach logistycznych i dystrybucyjnych wykorzystywane są coraz to nowsze i dające bardzo rozbudowane możliwości narzędzia. Biorąc pod uwagę, iż nakłady na wdrożenie strategii sterowania przepływem materiałów oraz informacji w takich systemach są coraz wyższe, wydaje się wręcz koniecznym dokonanie szeregu analiz wpływu stosowania tych strategii na pracę całego systemu przy pomocy narzędzi jakim są metody symulacyjne. Narzędzia służące do szybkiego modelowania i symulacji wzbogacone o interfejsy umożliwiające komunikację z systemami zarządzania przedsiębiorstwem, bazami danych, arkuszami kalkulacyjnymi oraz językami ogólnego przeznaczenia umożliwiają wykonywanie takich analiz z możliwością testowania praktycznie dowolnych algorytmów sterowania przepływami materiałowymi i informacyjnymi.

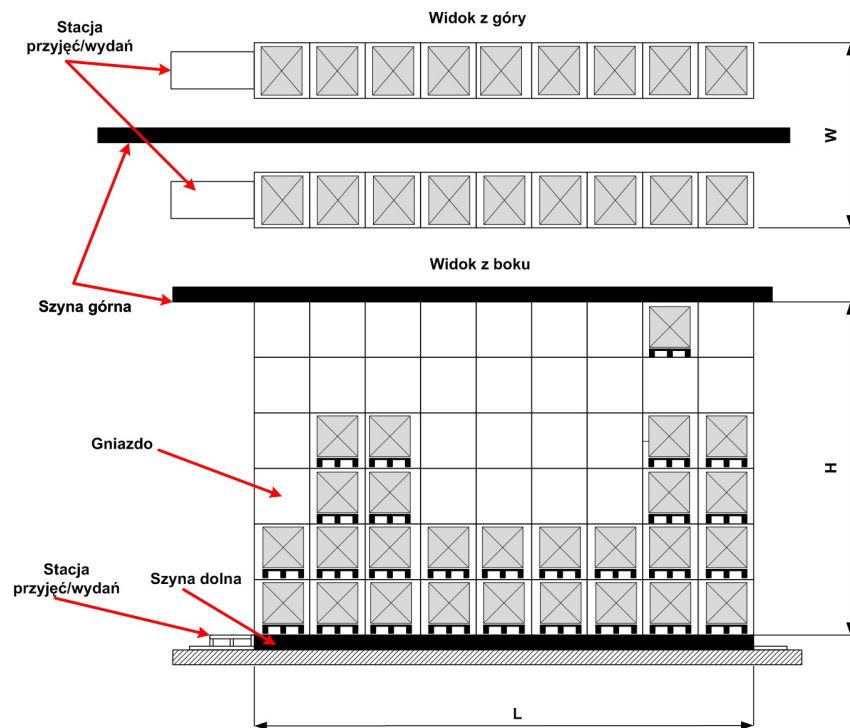
W artykule przedstawiono wybrane aspekty modelowania symulacyjnego procesów transportu wewnętrznego, w szczególności koncentrując się na analizie dynamicznego zachowania się urządzeń manipulacyjno-transportowych jakimi są układnice regałowe.

2. ROZWIĄZANIA TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO W ZAUTOMATYZOWANYCH SYSTEMACH MAGAZYNOWYCH

Jak wspomniano wyżej jednym z rozwiązań stosowanych coraz częściej w zakresie transportu wewnętrznego w centrach logistycznych i dystrybucyjnych jest zastosowanie systemu współpracującego z zestawem układnic regałowych (ang. *AS/RS – automated storage/retrieval systems*) wspomagających m.in. regały wysokiego składowania. Głównym zadaniem układnic regałowych jest przemieszczanie jednostek ładunkowych (palet, pojemników, itp.) w magazynowej strefie regałów. Urządzenia te przemieszczają się wzdłuż korytarza po przymocowanej do posadzki szynie jezdnej, a profil prowadzący umieszczony jest w górnej części regałów.

W typowej konfiguracji układnice mogą przenieść najwyżej jedną paletę. Palety, które mają być zeskładowane dostarczane są (np. przy pomocy przenośników) do stacji przyjęć i oczekują w buforze (ścieżce piętrzenia) aż do momentu kiedy układnica przetransportuje je na wyznaczone miejsce magazynowe. Palety z bufora pobierane są zgodnie z zasadą FIFO (ang. *first in, first out*), tzn. układnica w pierwszej kolejności weźmie te, które pierwsze tam weszły. Z drugiej strony palety pobierane z magazynu gdy już zostaną wyszukane przez układnicę, przewożone są do stanowiska przyjęć/wydań.

W większości zastosowań układnice regałowe ograniczone są tylko do jednego korytarza, ich wysoka dynamika w ruchu poziomym i pionowym oraz w pełni automatyczne funkcjonowanie usprawniają manipulowanie jednostkami ładunkowymi w obrębie magazynu.



Rys. 1. Schemat poglądowy regału magazynowego z korytarzem w widoku z boku i z góry z szynami układnicy

W literaturze można wskazać wiele modeli analitycznych opisujących pracę układnic regałowych [1, 4, 5, 6, 7]. Poniżej przedstawiono opis analityczny na podstawie opracowania M. P. Groover'a [5]. Jeżeli przyjąć, że x , y , z będą wymiarami jednostki ładunkowej (odpowiednio głębokość, długość oraz wysokość podawane w [mm]) to szerokość, długość oraz wysokość korytarza można wyrazić jako:

$$W = 3(x + a) \quad (1)$$

$$L = n_y(y + b) \quad (2)$$

$$H = n_z(z + c) \quad (3)$$

gdzie:

W - szerokość korytarza [mm],

L - długość korytarza [mm],

H - wysokość korytarza [mm],

a , b , c - odpowiednie tolerancje dla gniazda (komory) magazynowego [mm],

n_y - liczba segmentów regału wzdłuż jego długości,

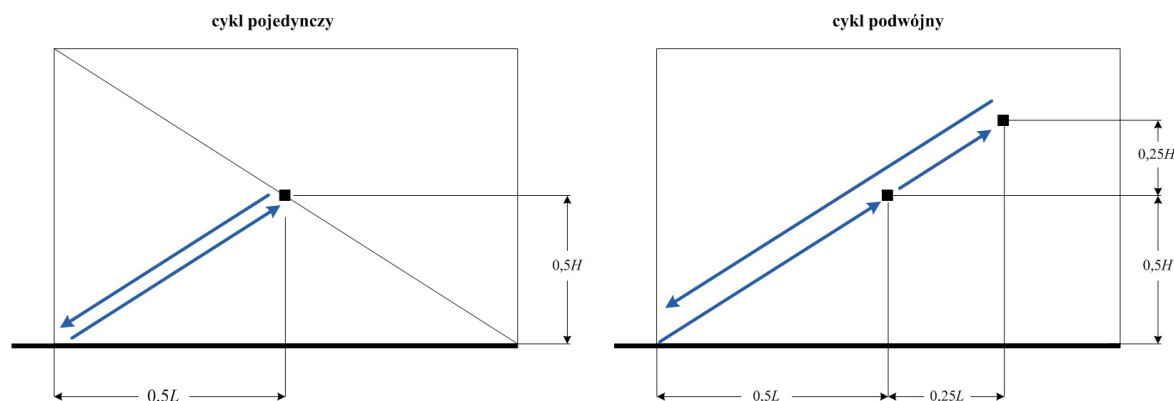
n_z - liczba miejsc regału wzdłuż wysokości.

Całkowita pojemność składowania w pojedynczym korytarzu zależy od ilości segmentów rozmieszczonych wzdłuż i w górę regału jak to przedstawiono na rysunku 1 i może być wyrażona jako:

$$C_k = 2n_y n_z \quad (4)$$

Wydajność układnicy jest zdefiniowana jako ilość transakcji, którą urządzenie jest zdolne wykonać w ciągu godziny pracy, przy czym transakcja jest tutaj rozumiana jako umieszczenie ładunku w regale lub pobranie ładunku z regału. Praca układnicy może przebiegać w trybach (trajektorie ruchu układnicy pokazano także na rys. 2):

- **cyklu pojedynczego** (prostego), w którym następuje jedynie wprowadzenie lub wyprowadzenie jednostki ładunkowej z regału,
- **cyklu podwójnego** (kombinowanego), dla którego układnica po zdeponowaniu w regale jednostki pobiera odpowiednie ładunek z regału i transportuje go do strefy wydań.



Rys. 2. Trajektorie ruchu układnicy dla cykli pojedynczego i podwójnego

Pracę układnic regałowych w magazynach wysokiego składowania determinuje m.in. metoda składowania towarów. Spośród różnorodnych sposobów składowania w nowoczesnych magazynach najczęściej wykorzystywane są:

- **składowanie losowe** (ang. *randomized storage*) - paleta może być zeskładowana w dowolnym miejscu w regale,
- **składowanie dedykowane** (ang. *dedicated storage*) - artykuły aktualnie są przypisane do konkretnych miejsc),
- **składowanie oparte na klasach (strefach)** (ang. *class-based storage*) - artykuły przypisane są do regały podzielone są na obszary według klas.

Pierwsza zasada pozwala wybierać dowolne nie zajęte miejsce składowania. Stosowanie zasady wolnych miejsc składowych wymaga odpowiedniej organizacji i kontroli, lecz koszty mogą być zrównoważone przez zmniejszenie wymaganej przestrzeni.

Składowanie oparte na klasach wymaga podziału strefy składowej na pola o zmiennej szybkości obrotu. Artykuły najczęściej klasyfikowane są zgodnie z zasadą ABC [1, 7, 8].

Jednym z problemów przy ustalaniu parametrów pracy układnicy jest analiza czasów cykli. W literaturze istnieje kilka metod służących do wyznaczania czasów cykli pracy oraz wydajności układnic [5, 6, 7]. Metoda przedstawiona poniżej rekomendowana jest przez Material Handling Institute [5] i zakłada, że:

- miejsca w regałach dla ładunków są przydzielane losowo,
- prędkości poruszania się układnicy w pionie i w poziomie są stałe,
- istnieje możliwość jednoczesnego poruszania się układnicy w kierunku pionowym i poziomym,
- wymiary każdej komórki w regale są takie same,
- stacja przyjęć/wydań ładunku znajduje się u podstawy i na początku korytarza.

Czas cyklu pojedynczego [min/cykl] można wyrazić jako:

$$T_{cs} = 2 \text{Max} \left\{ \frac{0,5L}{v_y}, \frac{0,5H}{v_z} \right\} + 2T_{pd} = \text{Max} \left\{ \frac{L}{v_y}, \frac{H}{v_z} \right\} + 2T_{pd} \quad (5)$$

gdzie:

T_{cs} – czas trwania cyklu pojedynczego (prostego) [min/cykl],

L – długość regału [mm],

H – wysokość regału [mm],

v_y – prędkość układnicy w kierunku poziomym [m/s],

v_z – prędkość układnicy w kierunku pionowym [m/s],

T_{pd} – oznacza czas przyjęcia lub wydania ładunku [s].

Dla cyklu podwójnego czas [min/cykl] wynosi:

$$T_{cd} = 2 \text{Max} \left\{ \frac{0,75L}{v_y}, \frac{0,75H}{v_z} \right\} + 4T_{pd} = \text{Max} \left\{ \frac{1,5L}{v_y}, \frac{1,5H}{v_z} \right\} + 4T_{pd} \quad (6)$$

gdzie:

T_{cd} – czas trwania cyklu podwójnego (kombinowanego) [min/cykl].

Wydajność urządzenia zależy od względnej liczby wykonanych cykli pojedynczych i podwójnych. Oznaczając przez R_{cs} jako liczbę pojedynczych cykli wykonanych przez urządzenie w ciągu godziny, a przez R_{cd} jako liczbę cykli podwójnych na godzinę można sformułować następujące równanie:

$$R_{cs}T_{cs} + R_{cd}T_{cd} = 60U \quad (7)$$

gdzie:

U – wykorzystanie układnicy w czasie jednej godziny. Parametr informuje o całkowitym czasie operacji wykonanych w ciągu godziny.

Aby rozwiązać równanie (7) należy przyjąć założenie o względnych proporcjach wskaźników R_{cs} oraz R_{cd} (np., że liczba cykli pojedynczych będzie równa liczbie cykli podwójnych, a wtedy $R_{cs} = R_{cd}$). Jeżeli przyjąć oznaczenie R_t jako całkowita liczba transakcji wykonanych w ciągu godziny można stwierdzić, że:

$$R_t = R_{cs} + 2R_{cd} \quad (8)$$

3. MODELE SYMULACYJNE WYBRANYCH ELEMENTÓW SYSTEMU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

Ze względu na wysoką złożoność współczesnych systemów logistycznych i dystrybucyjnych nie można przeprowadzić rzetelnych analiz wykorzystując jedynie tradycyjne metody bazujące na modelach analitycznych. W sytuacji kiedy zamierza się kompleksowo badać systemy transportu i przepływu materiałów uwzględniając ich dynamikę badacze mają do dyspozycji metody symulacji komputerowej. Zastosowanie takich technik do wspomagania decyzji i analizy problemów transportowych i logistycznych wymaga wydajnego narzędzia symulacyjnego, które jednocześnie jest łatwe w użyciu. Pakietem spełniającym te wymagania jest program DOSIMIS-3[®], który znalazł zastosowanie zarówno w przemyśle, usługach jak i w dydaktyce i badaniach naukowych.

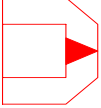


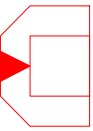
3.1. Środowisko symulacji

DOSIMIS-3[®] jest modułowo zorientowanym narzędziem symulacji, które w szczególności dostosowano do planowania i tworzenia modeli systemów transportu wewnętrznego i logistyki [2, 3]. Dzięki dostępnej bibliotece standardowych modułów reprezentujących rzeczywiste elementy, pakiet nawet dla niewielkich przedsięwzięć może być solidnym narzędziem do wspomagania procesów decyzyjnych. Praca symulatora opiera się na *procesach dyskretnych sterowanych zdarzeniami*.

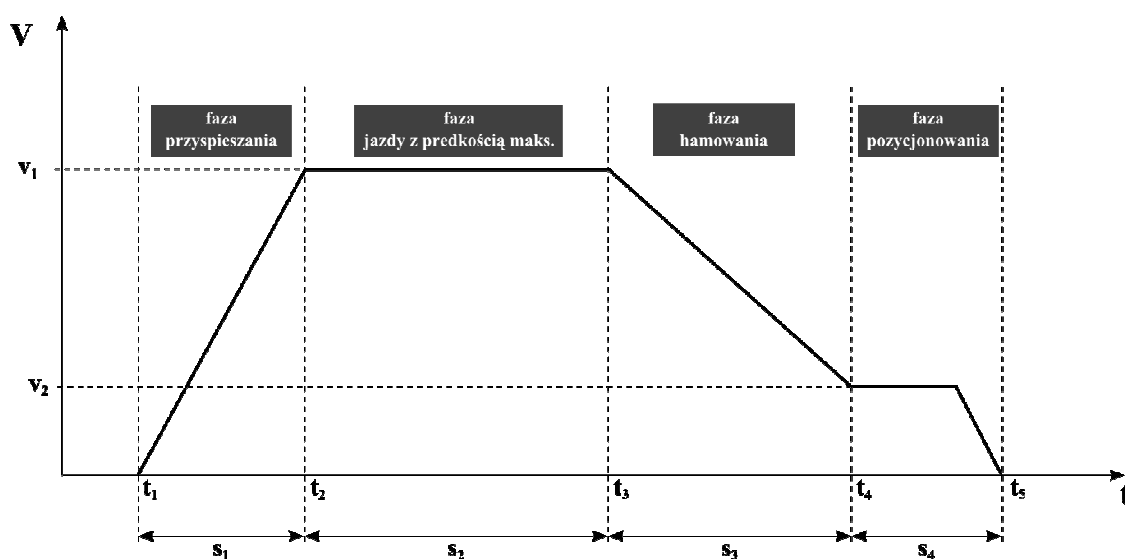
Podstawą obliczeń wykonywanych przez symulator są procedury obsługi zdarzeń zachodzących w systemie oraz procedury związane z obsługą upływu czasu. Pakiet składa się z symulatora, edytora modeli i programu umożliwiającego przeglądanie danych statystycznych. Podejście zastosowane w pakiecie umożliwia odwzorowanie elementów statycznych (zasobów) systemów transportowych i logistycznych takich jak m.in.: bufory, przenośniki rolkowe i przenośniki taśmowe, pojazdy wahadłowe, miejsca pracy, obróbki czy obsługi, zwrotnice (rozjazdy, skrzyżowania) oraz elementów, które mogą się przemieszczać.

W tablicy 1 przedstawiono najważniejsze moduły wykorzystywane w budowie modelu prezentowanego w artykule.

**Najważniejsze elementy stosowane przy planowaniu przepływu transportu
wewnątrzzakładowego w programie DOSIMIS-3**

	ŹRÓDŁO – odwzorowuje punkt wejścia materiału do systemu. wejście do magazynu; generuje obiekty ruchome, np. palety.
	BUFOR, ŚCIEŻKA PIĘTRZENIA – element odpowiadający drodze, jaką muszą pokonać palety, na którym obiekty mogą się piętrzyć.
	POJAZD WAHADŁOWY – element, którego zadaniem jest dostarczenie obiektów (np. palet) z punktu początkowego do punktu końcowego, poruszający się po zdefiniowanych drogach.
	SPLYW – element krańcowy systemu, do którego „spływają” obiekty ruchome przepływające przez system.

Na bliższą uwagę zasługuje element o nazwie „POJAZD WAHADŁOWY”, który jest podstawowym składnikiem modelu prezentowanym w pracy, umożliwiającym odwzorowanie ruchu układnicy. Każdy cykl ruchu pojazdu może być podzielony na cztery etapy (rys. 3). W pierwszym etapie pojazd jest przyspieszony do prędkości maksymalnej v_1 (faza przyspieszenia). W drugim etapie, pojazd porusza się z prędkością maksymalną, a następnie zwalnia do prędkości pozycjonowania v_2 . Po zakończeniu pozycjonowania pojazd osiąga cel i zatrzymuje się. Z punktu widzenia analizy pracy ważnym jest uwzględnienie przyspieszeń i opóźnień, których wartości mają duży wpływ na czasy cykli układnicy.



Rys. 3. Fazy pracy elementu POJAZD WAHADŁOWY

3.2. Założenia symulacji i omówienie modelu symulacyjnego

Procesy przyjęcia towaru do magazynu oraz jego wydania na zewnątrz w przypadku pojawienia się zlecenia są traktowane jako dwa niezależne procesy. Przyjęto założenie o losowym pojawianiu się zarówno zleceń, w wyniku których układnica pobiera paletę z magazynu, jak i palet, które urządzenie odstawi na odpowiedni regał do magazynu. Dodatkowo założono, że składowanie palet w magazynie odbywa się losowo.

Budowę modelu rozpoczęto od wprowadzenia odpowiednich parametrów dla każdego elementu modelu. Lista parametrów, ich typ oraz wartości i opis przedstawiono w tabelicy 2.

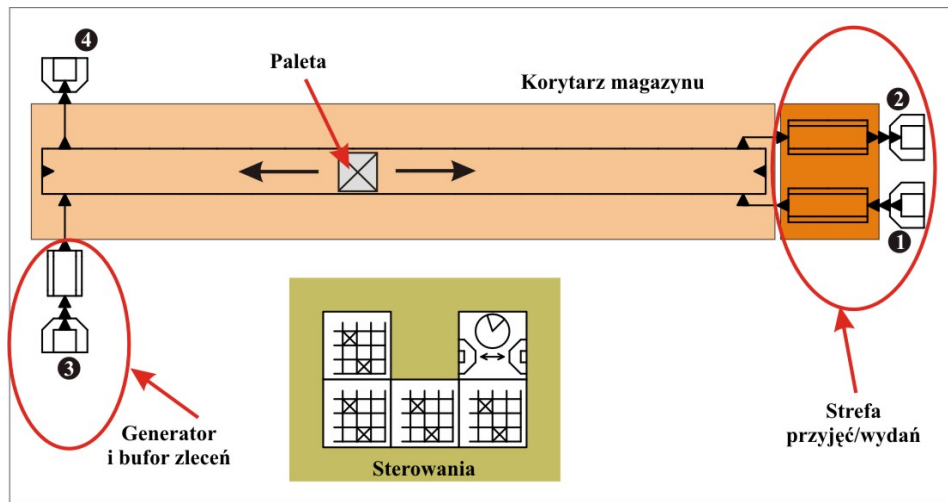
Tabela 2

Parametry modelu symulacyjnego

Parametr	Typ	Wartość	Opis
<i>LICZBA_MIEJSC_X</i>	integer	10	Liczba miejsc wzdłuż długości
<i>LICZBA_MIEJSC_Y</i>	integer	4	Liczba miejsc wzdłuż wysokości
<i>POJ_GNIAZDA</i>	integer	1	Pojemność miejsca magazynowego
<i>LEuro</i>	float	1,2	Długość europalety [m]
<i>HEuro</i>	float	1,8	Wysokość europalety z ładunkiem [m]
<i>v_std</i>	float	0,3	Standardowa prędkość transportu [m/s]
<i>v_x</i>	float	2,5	Prędkość w poziomie [m/s]
<i>a_x</i>	float	0,4	Przyspieszenie w poziomie [m/s ²]
<i>pt_x</i>	float	1,5	Czas pozycjonowania w poziomie [s]
<i>v_y</i>	float	0,6	Prędkość w pionie [m/s]
<i>a_y</i>	float	0,9	Przyspieszenie w pionie [m/s ²]
<i>pt_y</i>	float	1,5	Czas pozycjonowania w pionie [s]
<i>PAL_IN</i>	integer	1	Kod palety składowanej

Parametry typu całkowitego (integer) – *LICZBA_MIEJSC_X*, *LICZBA_MIEJSC_Y* oznaczają liczbę miejsc wzdłuż długości i szerokości. W modelu założono, że regał będzie posiadał 4 miejsca w pionie oraz 10 miejsc w poziomie, a w jednym gnieździe może znaleźć się jedna paleta (stała *POJ_GNIAZDA*). Parametry typu zmiennoprzecinkowego (float) – *v_x*, *a_x*, *pt_x*, *v_y*, *a_y* oznaczają prędkości i przyspieszenia osiągane przez układnicę w ruchu podłużnym i unoszącym. Schemat modelu układnicy zrealizowanego w środowisku DOSIMIS-3 zaprezentowano na rys 4. W przypadku pojawienia się palety na wejściu elementu (1) losowana jest dla niego pozycja, na którą ma trafić (4). Jeżeli wylosowana pozycja jest wolna obiekt (paleta) jest transportowany w wybrane miejsce, w przeciwnym przypadku następuje kolejne losowanie. Źródło (3) pełni funkcję generatora

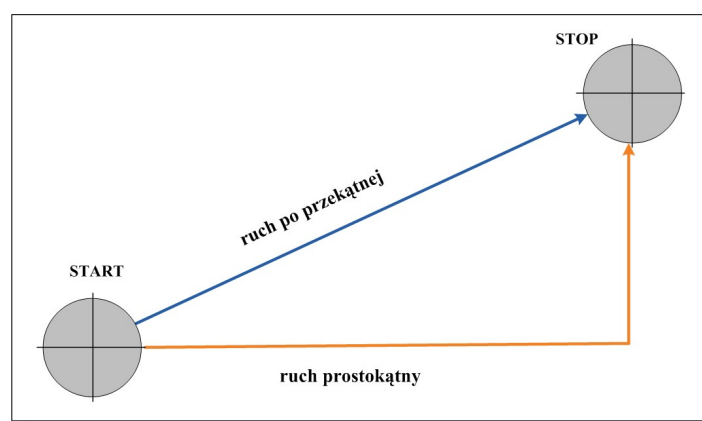
zleceń. W przypadku pojawienia się zlecenia losowana jest pozycja w magazynie, z której ma zostać pobrana paleta. W przypadku, gdy pod wybranym adresem paleta się znajduje jest ona pobierana i przetransportowana do wyjścia (2). Pozycje miejsc magazynowych do których mają trafić palety obliczane były z wykorzystaniem tabel decyzyjnych¹.



Rys. 4. Model układnicy regałowej zbudowany w środowisku DOSIMIS-3

3.3. Wyniki symulacji

Rozważono dwa tryby poruszania się układnicy (por. rys. 5): w pierwszym pojazd przemieszcza się wzdłuż regałów, następnie skręca pod kątem 90 stopni i dojeżdża do regału (ruch prostokątny), a w drugim pojazd przemieszcza się jednocześnie ruchem wzdłużnym jak i poprzecznym (ruch po przekątnej). Na rys. 6 przedstawiono przykładowe cykle czasowe analizowanych trybów pracy układnicy.



Rys. 5. Alternatywne tryby poruszania się układnicy

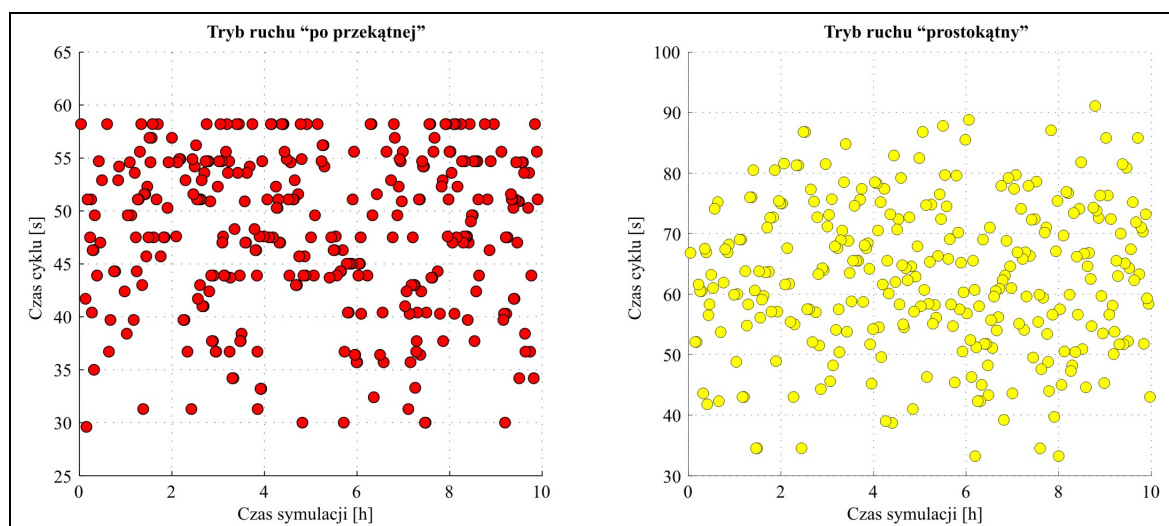
¹ Tabela decyzyjna – schemat, które można traktować jako reprezentację zbioru reguł decyzyjnych, wykorzystuje się je do odwzorowania procesów, w których podejmowane są decyzje (zwane akcjami bądź operacjami) zależne od spełnienia (lub nie) określonych warunków.

Ruch po przekątnej

Dla trybu ruchu układnicy po przekątnej minimalny czas cyklu, tzn. transportu palety z bufora na regały bądź z regałów do wyjścia wyniósł 29,40 [s], a wartość maksymalna cyklu wyniosła 58,20 [s]. Zarejestrowano średnio 324 zdarzenia wprowadzenia palety do magazynu oraz 317 zdarzeń pobrania palet.

Ruch prostokątny

W przypadku trybu pracy układnicy z prostokątną trajektorią ruchu minimalny czas cyklu, tj. przetransportowania obiektu z bufora na regały bądź z regałów do wyjścia wyniósł 33,00 [s], wartość maksymalna cyklu wyniosła 91,19 [s]. Średnia liczba cykli związanych z wprowadzeniem palety do magazynu wyniosła 296, a cykli pobrania obiektów była równa 294.



Rys. 6. Czas cyklu dla trybu ruchu po przekątnej

W tabelicy 3 zestawiono statystyki wyników symulacji dotyczące czasów cykli

Tablica 3

Wyniki symulacji – dane statystyczne dotyczące czasów cyklu dla różnych trybów ruchu układnicy

Czas cyklu	Tryb ruchu układnicy	
	po przekątnej	prostokątny
Średni [s]	48,00	62,99
Minimalny [s]	29,40	33,00
Maksymalny [s]	58,20	91,19

4. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w artykule rozwiązania transportowe zyskują coraz bardziej na znaczeniu w systemach magazynowych czy dystrybucyjnych. Uwzględniając ich złożoność, i wpływ na jakość pracy pozostałych elementów systemu do ich analizy należy wykorzystywać odpowiednie instrumenty. Do takich narzędzi, z pewnością można zaliczyć metody symulacji sterowanej zdarzeniami dyskretnymi. Modele tej klasy zaprezentowane w artykule umożliwiają odwzorowanie i analizę zależności czasowych badanych urządzeń.

Dalsze analizy mogą zostać rozszerzone o inne metody składowania oraz wykorzystanie danych rzeczywistych obciążeń wybranych systemów. Dodatkowo wskazany model może stanowić element składowy modelu rzeczywistego systemu centrum logistycznego lub magazynowego współpracujący z innymi modułami tego systemu.

Bibliografia

1. Arnold D., Furmans K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
2. Bukowski L., Karkula M., *The simulation of logistic processes using DOSIMIS-3 simulator*, Finanční a logistické řízení v kontextu vstupu České republiky do Evropské unie: sborník referátu z mezinárodní konference, Srđce Beskyd, 25-26.6.2003. 2. díl / VŠB - Technická univerzita Ostrava., s. 296-300.
3. DOSIMIS-3 User manual. Version 5.1, SDZ GmbH, Dortmund 2010.
4. Fijałkowski J.: *Transport wewnętrzny w systemach logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
5. Groover M.P.: *Automation, production systems and computer-integrated manufacturing*. Second edition, Prentice-Hall, New Jersey 2001.
6. Lerher T., Potrc I., Sraml M., Tollazzi T.: *Travel time models for automated warehouses with aisle transferring storage and retrieval machine*, European Journal of Operational Research, Vol. 205, Issue 3, 2010, pp. 571–583, DOI: 10.1016/j.ejor.2010.01.025.
7. Roodbergen K. J., Vis Iris F. A.: *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*, European Journal of Operational Research, Vol. 194, Issue 2, 2009, pp. 343–362, DOI: 10.1016/j.ejor.2008.01.038.
8. Schumann M.: *Zur Bestimmung der Umschlagleistung von Hochregallagern unter besonderer Berücksichtigung der Lagerorganisation*, Technischen Universität Chemnitz, 2008.

ANALYSIS OF SELECTED WAREHOUSE TRANSPORT PROCESSES USING SIMULATION METHODS

Abstract: The paper presents a simulation model of automated storage/retrieval (AS/RS) unit used as a mean of internal transport systems and storage facilities. The dynamic model of AS/RS was developed in the simulation environment DOSMIS-3. The results of numerical calculations for the different travel characteristics were presented.

Keywords: internal transport, crane stacker, modeling, simulation