

Aleksandra Sabo-Zielonka

Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach

Grzegorz Tarczyński

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

e-mail: a.sabo@wp.pl; grzegorz.tarczyński@ue.wroc.pl

PORÓWNANIE CZASÓW KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ DLA RÓŻNYCH SPOSOBÓW WYZNACZANIA TRASY MAGAZYNIERÓW NA PRZYKŁADZIE DUŻEGO CENTRUM LOGISTYCZNEGO

Streszczenie: W artykule dokonano studium przypadku jednej ze stref kompletacyjnych centrum logistycznego dystrybutora części i akcesoriów samochodowych. Celem pracy było porównanie efektywności różnych metod wyznaczania trasy magazynierów. Omówiona została organizacja pracy w magazynie i na jej tle przedstawiono różne metody wyznaczania trasy poruszania się magazyniera podczas procesu kompletacji zamówień (algorytm optymalny i heurystyki). W pracy porównano różne warianty realizacji procesu kompletacji i sporządzono ich ranking. Precyzyjna analiza otrzymanych rezultatów możliwa jest za pomocą wykresów dystrybuanty czasu kompletacji zamówień. Przeprowadzona analiza obejmowała studium przypadku i opierała się na danych rzeczywistych. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem symulacji przy użyciu programu Warehouse Real-Time Simulator.

Słowa kluczowe: kompletacja zamówień, magazynowanie, symulacje, studium przypadku.

DOI: 10.15611/ekt.2014.2.06

1. Wstęp

Jednym z najczęściej podejmowanych zagadnień wyznaczania trasy optymalnej jest problem komiwojażera. Komiwojażer wyjeżdża z punktu startowego i do niego powraca, odwiedzając po drodze wszystkie wyznaczone wcześniej lokalizacje tylko jeden raz. Cechą charakterystyczną wyznaczania tras przejścia jest łatwość sformułowania problemu, w przeciwieństwie do jego rozwiązania. Podstawowym problemem w zagadnieniu wyznaczania tras jest problem złożoności obliczeniowej (problemy klasy NP-Trudne).

Kompletacja zamówień (*order-picking*) należy do podstawowych procesów magazynowych. Ogólnie rzecz ujmując, polega na pobieraniu z miejsc składowania odpowiednich rodzajów i ilości asortymentów oraz zestawienia ich w odrębną, wydzieloną całość, która następnie zostaje przekazana do strefy wydań magazynu celem dostarczenia do odbiorcy. Trasę przejścia pracownika przez magazyn podczas kompletacji można porównać do trasy przemierzanej przez komiwojażera.

Ratliff i Rosenthal w 1983 r. stworzyli algorytm dokładny, pozwalający na rozwiązanie problemu komiwojażera w jednoblokowym prostokątnym magazynie [Ratliff, Rosenthal 1983]. Algorytm ten zapewnia znalezienie rozwiązania optymalnego w magazynach mających dowolną liczbę równoległe ułożonych alejek poprzecznych oraz dwa korytarze główne, znajdujące się na końcach alejek. Algorytm zakłada, że konstrukcja trasy kompletacji odbywa się w zadanym podgrafie. Problem znalezienia najkrótszej trasy kompletacji może być zatem rozwiązany poprzez znalezienie trasy podgrafu o minimalnej długości.

Hall zauważył, że metody heurystyczne wyznaczania tras kompletacji w magazynach umożliwiają osiągnięcie rozwiązań zbliżonych do optymalnych oraz dodatkowo pozwalają na uniknięcie kolizji i zatorów, które mogą się pojawić podczas jednoczesnej pracy wielu magazynierów, a przed którymi algorytm optymalny nie zabezpiecza [Hall 1993]. Petersen ocenił wyniki pięciu heurystyk wyznaczania tras kompletacji, a następnie porównał je z algorytmem optymalnym Ratliffa i Rosenthala [Petersen 1997]. Okazało się, że czasy uzyskane dla najlepszych heurystyk były średnio o 10% dłuższe w porównaniu z trasą optymalną [Van der Berg 1999]. Badania przeprowadzono dla magazynów o różnych kształtach, porównano także kilka wariantów punktów startu i stopu oraz dodatkowo rozpatrzono zamówienia z różną liczbą pozycji towarów na zamówieniach. Wyniki uzyskane przez Petersena nie są zbieżne z obliczeniami Halla. Obaj autorzy koncentrują się na wyznaczeniu dystansu pokonywanego przez magazynierów, który – jak pokazali De Koster i Van Der Poort [1998] – nie zawsze musi być proporcjonalny do czasu kompletacji.

Artykuł stanowi studium przypadku dużego, działającego na terenie Polski centrum logistycznego z częściami i akcesoriami samochodowymi. Celem pracy jest omówienie i porównanie czasów kompletacji dla wybranych metod wyznaczania trasy przejścia magazynierów przez magazyn. Zweryfikowana zostanie również hipoteza mówiąca o tym, iż sposób wyznaczania trasy przejścia przez magazyn może znacznie skrócić średni czas kompletacji zamówień. Analiza dotyczy jednej ze stref kompletacji. W opracowaniu omówione zostaną heurystyki: S-Shape, Midpoint, Return, Largest Gap oraz Combined. Następnie przeprowadzone zostaną obliczenia dla wymienionych heurystyk, których wyniki będą porównane z trasą optymalną, wyznaczoną zgodnie z algorytmem Ratliffa i Rosenthala.

Podstawę obliczeń stanowić będzie symulacyjny model komputerowy, w którym odzwierciedlono podstawowe czynniki wpływające na czas kompletacji, w rzeczywistości występujące w omawianej strefie kompletacji centrum logistycznego części i akcesoriów samochodowych, tj. jednoblokowy układ magazynu, scentralizowane

pole odkładcze, wielopoziomowe regały, kompletację ręczną typu „człowiek do towaru” bez wykorzystywania wózków widłowych. Do wyznaczenia charakterystyk losowych czasu trwania procesu kompletacji dla różnych sposobów wyznaczania trasy magazynierów wykorzystano program Warehouse Real-Time Simulator [Tarczyński 2013]¹.

2. Kompletacja zamówień

Jedną z kluczowych czynności wykonywanych w magazynie jest przemieszczanie towarów. Wyróżnia się cztery podstawowe operacje składające się na przemieszczanie, tj. (1) przyjmowanie towarów do magazynu ze środków transportu – przyjęcie, (2) przemieszczanie towarów do określonego miejsca w magazynie – rozlokowanie towarów, (3) skonfigurowanie odpowiednich zestawów towarów w celu realizacji zamówień klienta – kompletacja towarów, (4) ładowanie towarów w celu wysłania ich do klienta lub na linię produkcyjną – wydanie towarów [Coyle, Bardi, Langley 2002].

Proces kompletacji jest funkcją technologicznego procesu magazynowania, która polega na pobieraniu z miejsc składowania odpowiednich rodzajów i ilości asortymentów oraz zestawianiu ich w odrębną, wydzieloną całość, która następnie zostanie przekazana do strefy wydań magazynu celem wysłania do odbiorcy. W skrócie jest to proces polegający na przygotowaniu towarów na potrzeby zamówienia.

W literaturze opisanych jest wiele wariantów pobrań towarów. Do podstawowych można zaliczyć [Chiang, Chen, Wu 2005]:

- kompletację zamówień pojedynczych, jest to tzw. kompletacja prosta (*strict-order picking*), która występuje wówczas, gdy pojedyncze zlecenie kompletacji realizowane jest przez jednego pracownika magazynu (relacja 1:1).
- kompletację łączną (*batchpicking/multi-order picking*), polegającą na łączeniu zamówień pojedynczych w listy kompletacyjne (*picklists*) oraz wskazaniu, które zamówienia mają się znajdować we wspólnej kompletacji; zlecenia, które podlegają konsolidacji, zawierają z reguły niewiele pozycji asortymentu (relacja $n:1$).
- kompletację strefową (*one picking*), przy której dokonuje się podziału magazynu na strefy oraz dekompozycji napływających zamówień względem stref kompletacji; do jednej strefy przydzielony jest z reguły jeden pracownik, który kompletuje zamówienia w danej strefie (relacja $n:1$ lub $n:2$).

W dalszej części pracy analiza ograniczona zostanie do kompletacji strefowej, która poddana procedurze dekompozycji zamówień na poszczególne strefy, sprowadza się finalnie do kompletacji prostej (w ramach jednej strefy).

Zarówno w literaturze [Coyle, Bardi, Langley 2002], jak i w praktyce występują dwa główne systemy kompletowania towarów: „człowiek do towaru” (*picker-*

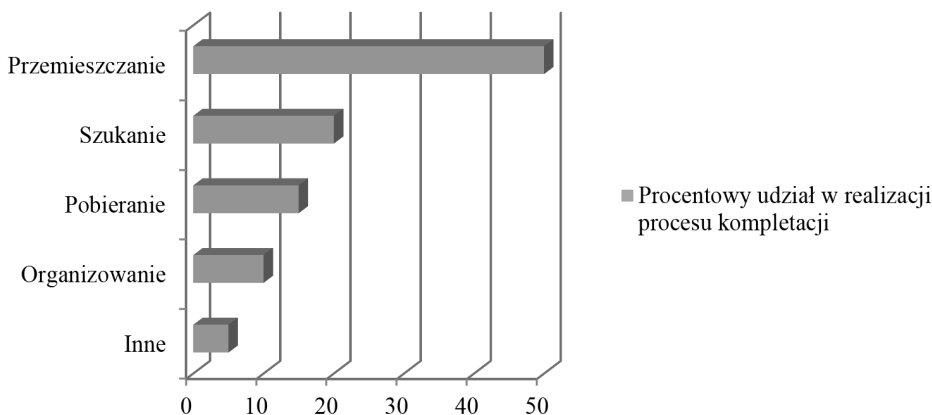
¹ Program dostępny jest na stronie kbo.ue.wroc.pl -> podstrona „pracownicy – adiunkci” -> podstrona „Grzegorz Tarczyński”.

-to-part systems) oraz „towar do człowieka” (*part-to-picker systems*). W systemach typu „człowiek do towaru” osoba kompletująca zamówienie musi dotrzeć do miejsca składowania towaru celem jego pobrania. Natomiast w systemach typu „towar do człowieka” dana pozycja asortymentu przemieszcza się za pomocą specjalnych zautomatyzowanych urządzeń do osoby kompletującej zamówienie. Systemy te cechują się większym kosztem początkowym (koszty wdrożenia), natomiast znacznie skracają czas przemieszczania się po magazynie.

W centrum logistycznym będącym przedmiotem badań wdrożono system kompletacji typu „człowiek do towaru” – magazyn ten jest przykładem centrum logistycznego, w którym wszystkie towary pobierane są przez magazyniera ręcznie. Taki model kompletacji wymaga przeznaczenia większości czasu na przemieszczanie i pobieranie towarów.

Czynności związane z kompletacją zamówień są czasochłonne i pracochłonne. Badania przeprowadzone w Wielkiej Brytanii wykazały, że około 63% kosztów operacyjnych magazynowych generowanych jest przez czynności składające się na proces kompletacji [Tompkins i in. 2003]. Do czynności tych można zaliczyć przede wszystkim przemieszczanie się po magazynie, poszukiwanie towarów, pobieranie towarów z miejsc składowania oraz czynności związane z organizowaniem. Procentowy udział poszczególnych czynności konsumujących czas składający się na proces kompletacji zamówień [Drury 1998] został zaprezentowany na rys. 1.

Procentowy udział czynności w realizacji procesu kompletacji



Rys. 1. Procentowy udział czynności składających się na proces kompletacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Drury 1998].

Z wykresu wynika, że podczas procesu kompletacji zamówień czas przemieszczania się stanowi około połowy całkowitego czasu składającego się na kompletację, dlatego optymalizacja tego elementu jest niezwykle istotna.

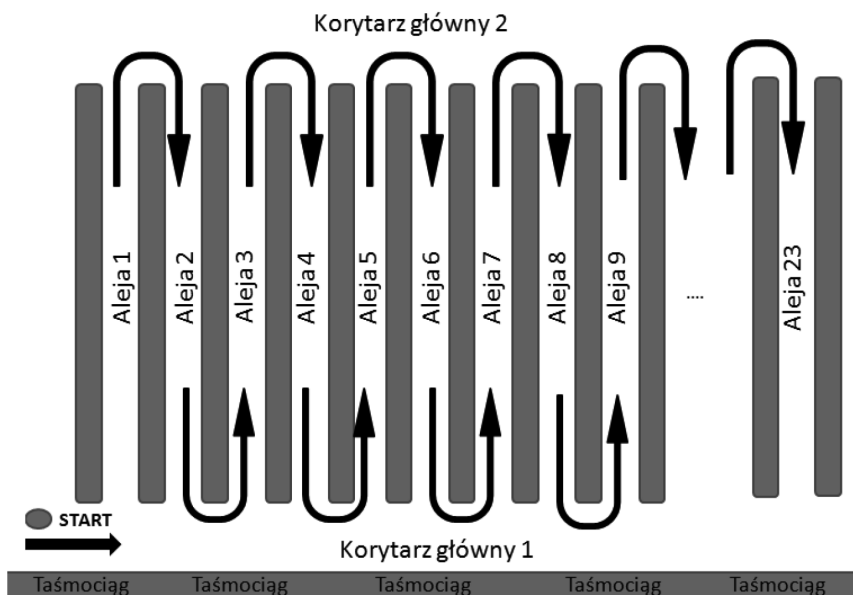
Zagadnienia optymalizacji procesów magazynowych poruszane były również przez polskich autorów, np. [Korzeniowski 1997; Jacyna, Kłodawski 2009].

3. Centrum logistyczne

Przedmiotem badań i analiz jest centrum logistyczne firmy, będącej jednym z kluczowych dystrybutorów akcesoriów i części zamiennych do samochodów osobowych, ciężarowych i dostawczych na rynku polskim. Firma zajmuje się również dostarczaniem sprzętu i narzędzi do warsztatów i jest przykładem nowoczesnego centrum logistycznego, w którym istnieje możliwość składania zamówień *on-line*.

Centrum logistyczne podzielone jest na 17 stref składowania towarów. Każda strefa jest inaczej zorganizowana (ma inną strukturę), co wynika bezpośrednio z fizycznych możliwości podziału obiektu oraz z faktu etapowej budowy magazynu. Dodatkowo liczba regałów i alejek w sektorach nie jest stała ze względu na różne wymiary przechowywanego asortymentu – od małych żarówek, po sporych rozmiarów beczki z olejem.

W pracy skoncentrowano się na analizie problemu kompletacji zamówień realizowanych w sektorze H. Struktura sektora H obejmuje dwa korytarze główne oraz 23 równoległe alejki, ułożone prostopadłe do korytarzy głównych. Poziomy rzut sektora H został zaprezentowany na rys. 2.



Rys. 2. Rzut poziomy sektora H

Źródło: opracowanie własne.

W każdej z alejek jest 68 regałów, rozmieszczonych dwustronnie wzdłuż alei. Nieparzyste numery regałów umieszczone są po lewej stronie, a parzyste – po prawej. Każdy z regałów składa się z 8 poziomów składowania, na których możliwe jest przechowywanie do 7 różnych jednostek asortymentu (w zależności od gabarytu). Poziomy oznaczone są alfabetycznie: od A do H, przy czym A to poziom najniższy, a H to poziom najwyższy.

Kompletowane towary odkładane są na przenośnik taśmowy, umieszczony prostopadle wzdłuż wszystkich alejek. Warunkiem odłożenia koszyka na przenośnik taśmowy jest skompletowanie całego zamówienia. W przyjętym na potrzeby tej pracy modelu założono (podobnie jak w większości analiz teoretycznych), że wymiary towarów są nieznane i nieistotne. Można zatem przyjąć, że czas pobrania wszystkich towarów na określonym poziomie składowania jest taki sam, a koszyk nigdy się nie przepelnia. Puste koszyki zawsze są pobierane z jednego miejsca oznaczonego, jako START na rys. 2.

Rozmieszczenie asortymentów w magazynie jest zaplanowane według ściśle określonych zasad. Najcięższe towary umieszczone są na najniższym poziomie (bezpośrednio na podłożu), aby nie obciążały regałów i półek, dlatego też liczba indeksów na poziomie A jest niższa. Na dwóch najwyższych poziomach z kolei umieszcza się towar tylko wówczas, gdy brakuje dostępnych lokalizacji na poziomach niższych lub towar jest słabo rotujący. W sektorze H pobranie towarów z najwyższych poziomów (G oraz H) jest bardziej czasochłonne, ponieważ wymaga użycia drabinki. Ilościowy rozkład indeksów towarów na poszczególnych poziomach został zaprezentowany w tab. 1.

Tabela 1. Liczba indeksów towarów na poszczególnych poziomach

Poziom	Liczba indeksów
A	1056
B	1876
C	2184
D	2334
E	2054
F	1453
G	989
H	6

Źródło: opracowanie własne.

W dobrze zorganizowanym magazynie na wysokich półkach powinny się znajdować jedynie zapasy. Podstawowe miejsca pobierania powinny być dostępne bez drabinki czy podestu.

W przeprowadzonych symulacjach przyjęto, że prawdopodobieństwo pobrania wszystkich towarów jest takie samo, z wyjątkiem poziomów G i H, gdzie przecho-

wywany jest towar mało rotujący. Prawdopodobieństwo pobrania jakiegokolwiek towaru z tych poziomów jest 15-krotnie niższe niż dla pozostałych towarów.

Na potrzeby badań problem kompletacji został nieco uproszczony, jednakże zarówno odwzorowanie wymiarów, struktury magazynu, jak i większości założeń odpowiada rzeczywistości.

Podczas procesu kompletacji zamówień w magazynie magazynier jednocześnie realizuje zawsze tylko jedno zamówienie. Średni czas zainicjowania zamówienia, czyli pobrania koszyka przez magazyniera, wynosi 5 sekund. Średni czas pobrania pojedynczego towaru z poziomów B-F wynosi od 5 do 15 sekund.

Na czynność pobrania pojedynczego towaru składają się następujące czynności:

- zeskanowanie kodu pola odkładczego za pomocą terminalu ręcznego;
- zeskanowanie kodu towaru za pomocą terminalu ręcznego;
- zeskanowanie kodu koszyka za pomocą terminalu ręcznego;
- umieszczenie towaru w koszyku.

W tabeli 2 zaprezentowano średnie czasy pobrań towarów z poszczególnych poziomów.

Tabela 2. Średnie czasy pobrań towarów na poszczególnych poziomach

Poziom	Czas w sekundach
A	20
B, C, D, E, F	10
G, H	25

Źródło: opracowanie własne.

Zróznicowanie czasów pobrań towarów jest ściśle powiązane z poziomem składowania. Na poziomie A, ze względu na większe gabaryty i wagę towarów, pobranie towaru wynosi 20 sekund. Najwyższe poziomy (G, H) wymagają użycia drabinki, absorbując tym samym dodatkowe 15 sekund na potrzeby pobrania towaru. Natomiast na poziomach B-F, do których dostęp jest najłatwiejszy, a towary na nich składowane mają (w przyjętym modelu) standardowe wymiary i wagę, pobranie towaru trwa 10 sekund. W obliczeniach pominięto analizę ilości pobieranego towaru tego samego typu. Przyjęto, że czas pobrania 1 sztuki towaru będzie taki sam jak czas pobrania 10 sztuk, a szybkość poruszania się magazyniera to 5 km/h.

W analizowanym centrum logistycznym praca magazynierów jest na bieżąco monitorowana i wyznaczone są normy średniego czasu kompletacji 1 towaru. Pracownicy w sektorze H przemieszczają się po z góry ustalonej trasie, przypominającej dobrze opisaną w literaturze heurystykę S-shape. Średni czas pobrania 1 towaru (łącznie z odstawieniem go na przenośnik taśmowy) wynosi dla zamówień 15-elementowych około 21 sekund. Normy te znajdują odzwierciedlenie w przyjętym modelu symulacyjnym.

Na potrzeby badań zamówienia zostały wygenerowane losowo (z rozkładu jednostajnego, z uwzględnieniem mniejszego prawdopodobieństwa pobrania towarów z poziomów G i H) – dla każdego analizowanego wariantu zbadany został czas kompletacji blisko 18 000 zamówień (De Koster i Van der Poort [1998] pokazali, że w przypadku symulacji minimalna liczba zamówień musi wynosić około 10 000). Liczba pozycji na zamówieniach jest stała dla każdego z następujących wariantów:

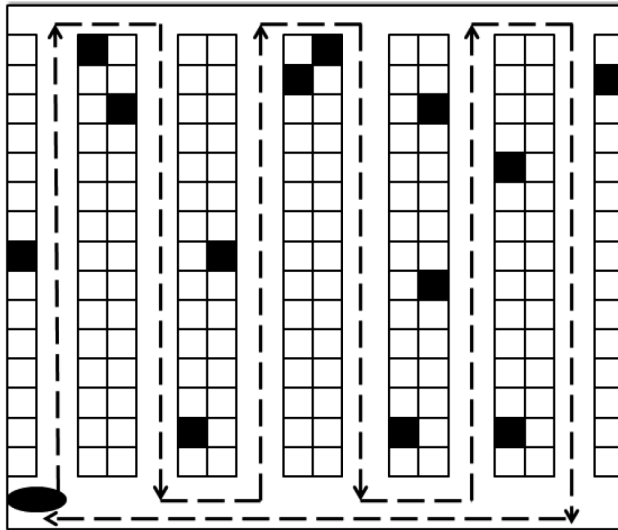
- I. Wszystkie zamówienia mają po 5 towarów.
- II. Wszystkie zamówienia mają po 10 towarów.
- III. Wszystkie zamówienia mają po 15 towarów.
- IV. Wszystkie zamówienia mają po 20 towarów.

4. Techniki wyznaczania tras kompletacji w magazynie

W praktyce problem wyznaczania tras kompletacji w magazynie jest rozwiązywany głównie przy wykorzystaniu heurystyki *S-Shape* [De Koster, Van Der Port 1998]. Wynika to przede wszystkim z faktu, że nie zawsze możliwe jest wykorzystanie algorytmu optymalnego dla każdego układu magazynu. Z drugiej zaś strony trasy optymalne dla osób kompletujących zamówienia mogą się wydawać nielogiczne zaplanowane. Dodatkowo algorytmy optymalne nie pozwalają zapobiec niepożądanym zdarzeniom, takim jak np. zatory w trakcie pobierania towarów czy kolizje, podczas gdy niektóre metody heurystyczne umożliwiają uniknąć takich wypadków (np. metoda *S-Shape*) [De Koster, Le-Duc, Roodbergen 2007].

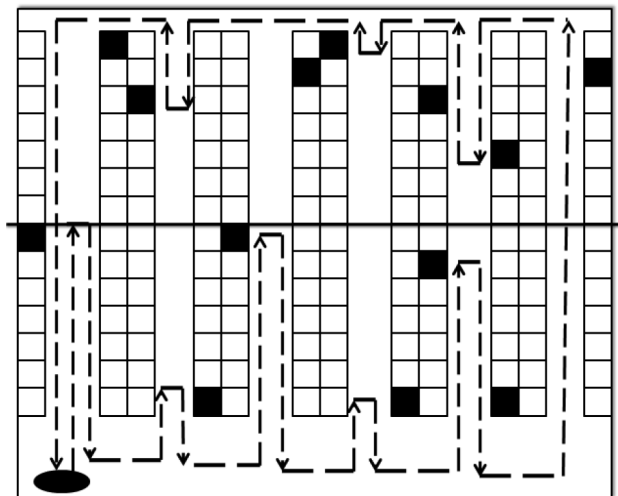
Jedną z najprostszych i najbardziej popularnych heurystyk jest heurystyka *S-Shape*, której logika poruszania się polega na tym, że pracownik magazynu, kompletując zamówienia, porusza się trasą w kształcie przypominającym literę S. Proces kompletacji rozpoczyna się w punkcie startowym (najczęściej punkcie poboru koszyka). Następnie magazynier skręca w najbliższą punktowi startowemu alejkę, w której występuje towar do pobrania, aby na końcu alejki skręcić w korytarz boczny i wejść w kolejną aleję, w której wymagane jest pobranie towaru. Tylko aleje zawierające co najmniej jeden element znajdujący się na zamówieniu są odwiedzane i konieczne jest przejście całej ich długości (bez możliwości powrotu). Aleje, w których nie ma potrzebnych towarów, są pomijane. Schemat przejścia magazyniera przez magazyn został zaprezentowany na rys. 3.

Inną heurystyką służącą do wyznaczania trasy przejścia przez magazyn jest metoda *Midpoint*. Metoda ta na wstępie zakłada podział magazynu na połowy. Podczas przejścia przez magazyn osoba kompletująca zamówienie wchodzi w pierwszą aleję, zawierającą towar do pobrania, następnie pobiera wszystkie towary w danej alei, znajdujące się przed wyznaczoną wcześniej połową, aby następnie powrócić do korytarza głównego. Analogicznie odwiedzane są kolejne aleje, w których znajdują się towary wymagające pobrania. Ostatnia aleja przemierzana jest w całości. Przykład wykorzystania heurystyki *Midpoint* przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Heurystyka *S-Shape*

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Chiang, Chen, Wu 2005].

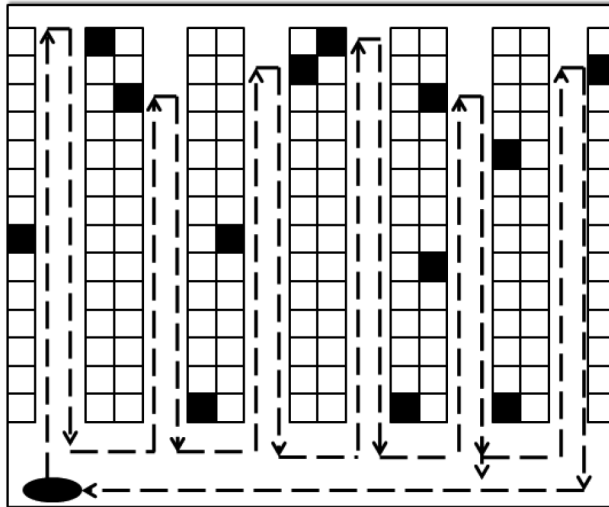


Rys. 4. Heurystyka *Midpoint*

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Chiang, Chen, Wu 2005].

Metoda *Return* jest kolejną heurystyką wykorzystywaną przy wyznaczaniu trasy przejścia przez magazyn. W praktyce polega ona na odwiedzeniu każdej z alejek, w których występują towary wymagające kompletacji. Magazynier, wchodząc do

alei, dociera tak głęboko, aż pobierze wszystkie towary w danej alejce, a następnie powraca do korytarza głównego. Schemat przebiegu tego procesu zaprezentowano na rys. 5.

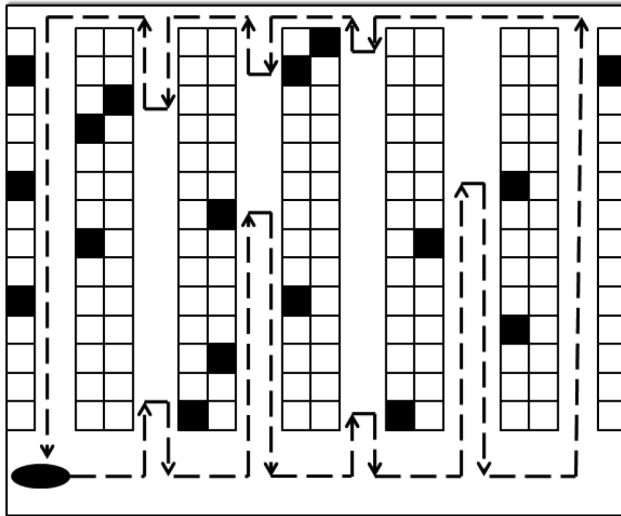


Rys. 5. Heurystyka *Return*

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Chiang, Chen, Wu 2005].

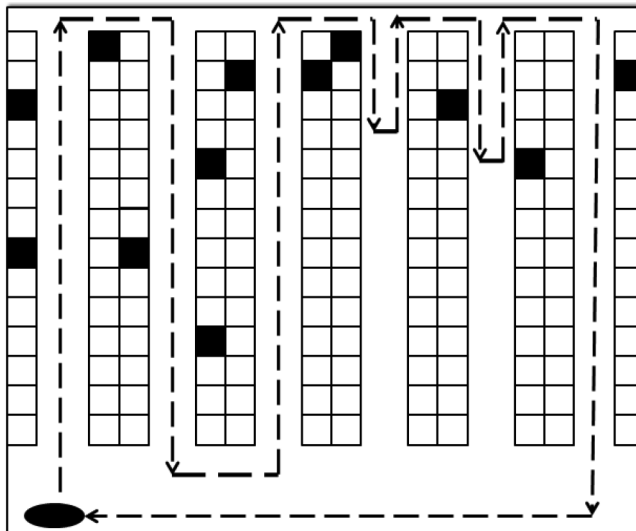
Trasy wyznaczone za pomocą kolejnej metody: *Largest gap* (rys. 6), są często podobne do otrzymanych przy użyciu metody *Midpoint*, ponieważ obie metody opierają się na podobnych fundamentach: podziale magazynu na dwie części i kompletowaniu towarów najpierw z jednej, a dopiero później z drugiej z nich. W odróżnieniu od metody *Midpoint*, tutaj magazynier, wchodząc do poszczególnych alejek, może wyjść poza granicę ich środka. Magazynier może wchodzić daleko w głąb jednej alejki, dopóki nie dotrze do najdłuższego odstępu pomiędzy dwoma towarami. Odstęp między dwoma towarami jest rozumiany jako (1) odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi towarami koniecznymi do pobrania, (2) odległość między dolnym korytarzem głównym a pierwszym towarem do pobrania lub (3) odległość między górnym korytarzem głównym a ostatnim towarem do pobrania [Le-Duc 2005]. Jeżeli magazynier dotarł do najdłuższego odstępu pomiędzy towarami, powinien powrócić do korytarza głównego, z którego wszedł do danej alejki.

Ostatnią omawianą metodą wyznaczania trasy magazyniera jest heurystyka *Combined* (rys. 7), zgodnie z którą magazynier odwiedza każdą z alejek, gdzie występują towary wymagające kompletacji, a alejki bez towarów do pobrania są pomijane. Po wejściu do danej alejki pobierane są wszystkie towary wymagające kompletacji. Kompletacja w ramach jednej alejki odbywa się podczas jednego przejścia. Po



Rys. 6. Heurystyka *Largest gap*

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Chiang, Chen, Wu 2005].



Rys. 7. Heurystyka *Combined*

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Chiang, Chen, Wu 2005].

pobranu ostatniego towaru w alejce konieczne jest podjęcie decyzji, czy powrócić do dolnego korytarza głównego, czy przejść do górnego korytarza głównego. Wybierana jest opcja bardziej korzystna.

5. Wyniki symulacji komputerowej

Niezbędne symulacje komputerowe przeprowadzono z wykorzystaniem programu Warehouse Real-Time Simulator [Tarczyński 2013]. Tabela 3 przedstawia średnie czasy kompletacji zamówień dla list kompletacyjnych zawierających 5, 10, 15 i 20 towarów dla różnych metod wyznaczania trasy i ich porównanie z heurystyką *S-Shape*. Wyniki dla stosowanej do tej pory w magazynie metody *S-Shape* są od 7,8% do 12,31% gorsze od możliwych do uzyskania przy wykorzystaniu najkrótszej możliwej trasy. Heurystyka *Midpoint* i jej ulepszona (ale i trudniejsza do praktycznego zastosowania) wersja *Largest gap* dają rezultaty zaledwie o około 2% gorsze od metody optymalnej. Gorszy średni czas kompletacji zamówień od metody *S-Shape* uzyskano tylko dla heurystyki *Return*. Wydaje się więc, że dalsze stosowanie w magazynie tras wyznaczanych według reguły *S-Shape* jest niewskazane, ponieważ powoduje niepotrzebne wydłużenie czasu kompletacji.

Tabela 3. Średnie czasy kompletacji zamówień dla różnych metod wyznaczania trasy magazyniera i zmiennej liczby towarów na zamówieniu (w nawiasach czas kompletacji jako procent czasu optymalnego)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera					
		S-Shape	Midpoint	Return	Largest gap	Combined	Optimal
Liczba towarów na zamówieniu	5	2:51 (107,80%)	2:42 (101,95%)	2:52 (108,46%)	2:42 (101,79%)	2:45 (103,70%)	2:39 (100,00%)
	10	4:02 (111,45%)	3:42 (102,12%)	4:06 (113,29%)	3:41 (101,68%)	3:50 (105,73%)	3:37 (100,00%)
	15	5:01 (112,31%)	4:34 (102,35%)	5:10 (115,49%)	4:32 (101,59%)	4:45 (106,32%)	4:28 (100,00%)
	20	5:53 (112,06%)	5:19 (101,16%)	6:08 (116,52%)	5:20 (101,59%)	5:35 (106,30%)	5:15 (100,00%)

Źródło: opracowanie własne.

Program Warehouse Real-Time Simulator przy generowaniu list kompletacyjnych korzysta z generatora liczb pseudolosowych i daje możliwość ustawienia punktu startowego tegoż generatora. W efekcie możliwe jest wielokrotne powtarzanie tego samego doświadczenia w innych warunkach. Takie same zamówienia pojawiające się w magazynie dokładnie w tych samych momentach czasu umożliwiają precyzyjne skonfrontowanie heurystyk i metody optymalnej ze sobą. W tabelach 4-11 znajdują się wyniki porównania czasów kompletacji wszystkich wygenerowanych zamówień (dla każdego eksperymentu przeprowadzono 17 995 replikacji) dla metody *S-Shape* z pozostałymi heurystykami i metodą optymalną.

Dla zamówień 5-elementowych (tab. 4) aż 92,44% (16 635 spośród 17 995) zamówień realizowanych za pomocą metody *Midpoint* dało krótszy czas niż w przypadku metody *S-Shape*. 45,03% zamówień wykonano szybciej, co najmniej o 10 sekund, a 5,87% szybciej o 20 sekund. Stosując metodę *Midpoint*, okazało się, że żadne zamówienie 5-elementowe nie zostało zrealizowane szybciej o 30 sekund niż w przypadku metody *S-Shape*. Tylko dla metody optymalnej 9 zamówień (0,05%) wykonanych zostało krócej o co najmniej 30 sekund. Z tabeli 5 wynika, że zaledwie 7,56% zamówień realizowanych z wykorzystaniem heurystyki *Midpoint* dało gorszy czas kompletacji niż w metodzie *S-Shape*, przy czym zaledwie 32 zamówienia (0,18%) realizowano dłużej o co najmniej 10 sekund.

Dla zamówień 10-, 15- i 20-elementowych korzyść z zastosowania heurystyki *Midpoint* zamiast *S-Shape* jest jeszcze większa. Ponad 98% zamówień realizowanych jest szybciej. Dla zamówień 20-elementowych dla blisko połowy z nich przy metodzie *Midpoint* uzyskano wyniki lepsze o co najmniej 30 sekund niż podczas stosowania dotychczasowej metody. Czasy gorsze uzyskano dla 1,29% zamówień, a gorsze o co najmniej 20 sekund zaledwie dla 0,01% zamówień.

Tabela 4. Procent zamówień realizowanych szybciej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 5-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		<i>Midpoint</i>	<i>Return</i>	<i>Largest gap</i>	<i>Combined</i>	<i>Optimal</i>
Interwał	0:00	92,44%	43,78%	94,42%	82,31%	100,00%
	0:10	45,03%	11,79%	45,76%	27,53%	63,67%
	0:20	5,87%	0,83%	5,88%	2,19%	12,59%
	0:30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%
	0:40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Procent zamówień realizowanych wolniej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 5-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		<i>Midpoint</i>	<i>Return</i>	<i>Largest gap</i>	<i>Combined</i>	<i>Optimal</i>
Interwał	0:00	7,56%	56,22%	5,58%	17,69%	0,00%
	0:10	0,18%	17,18%	0,07%	0,00%	0,00%
	0:20	0,00%	1,43%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6. Procent zamówień realizowanych szybciej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 10-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		<i>Midpoint</i>	<i>Return</i>	<i>Largest gap</i>	<i>Combined</i>	<i>Optimal</i>
Interwał	0:00	98,09%	35,78%	99,24%	95,13%	100,00%
	0:10	86,39%	13,93%	90,13%	60,67%	97,00%
	0:20	51,85%	3,03%	55,77%	17,28%	71,93%
	0:30	15,80%	0,44%	16,42%	2,01%	26,82%
	0:40	1,77%	0,02%	1,86%	0,07%	4,28%
	0:50	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,10%
	1:00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 7. Procent zamówień realizowanych wolniej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 10-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		<i>Midpoint</i>	<i>Return</i>	<i>Largest gap</i>	<i>Combined</i>	<i>Optimal</i>
Interwał	0:00	1,91%	64,22%	0,76%	4,87%	0,00%
	0:10	0,06%	32,84%	0,01%	0,00%	0,00%
	0:20	0,01%	10,22%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:30	0,00%	1,49%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:40	0,00%	0,08%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	1:00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8. Procent zamówień realizowanych szybciej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 15-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		<i>Midpoint</i>	<i>Return</i>	<i>Largest gap</i>	<i>Combined</i>	<i>Optimal</i>
Interwał	0:00	98,62%	26,49%	99,71%	97,65%	100,00%
	0:10	92,50%	10,51%	96,44%	74,70%	99,45%
	0:20	71,96%	2,71%	79,47%	31,62%	90,87%
	0:30	39,13%	0,52%	45,08%	6,90%	60,59%
	0:40	13,13%	0,07%	14,82%	0,74%	23,66%
	0:50	2,28%	0,01%	2,58%	0,06%	5,08%
	1:00	0,22%	0,00%	0,25%	0,00%	0,61%
	1:10	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
	1:20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 9. Procent zamówień realizowanych wolniej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 15-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		Midpoint	Return	Largest gap	Combined	Optimal
Interwał	0:00	1,38%	73,51%	0,29%	2,35%	0,00%
	0:10	0,09%	47,95%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:20	0,01%	21,84%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:30	0,00%	6,66%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:40	0,00%	1,09%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:50	0,00%	0,11%	0,00%	0,00%	0,00%
	1:00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 10. Procent zamówień realizowanych szybciej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 20-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		Midpoint	Return	Largest gap	Combined	Optimal
Interwał	0:00	98,71%	17,53%	99,87%	98,60%	100,00%
	0:10	93,36%	6,63%	97,82%	81,41%	99,86%
	0:20	76,77%	1,73%	86,96%	40,39%	96,04%
	0:30	48,94%	0,31%	59,61%	11,08%	76,57%
	0:40	21,68%	0,03%	27,77%	1,82%	41,36%
	0:50	6,57%	0,00%	8,29%	0,16%	14,49%
	1:00	1,12%	0,00%	1,42%	0,01%	2,92%
	1:10	0,14%	0,00%	0,15%	0,00%	0,33%
	1:20	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
1:30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

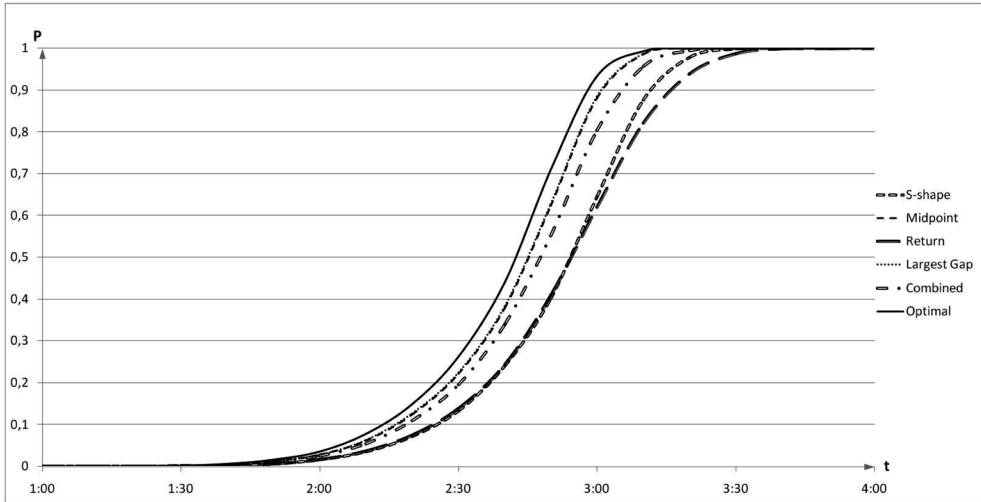
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 11. Procent zamówień realizowanych wolniej niż dla metody *S-Shape* co najmniej o zadany interwał (dla zamówień 20-elementowych)

		Metoda wyznaczania trasy magazyniera				
		Midpoint	Return	Largest gap	Combined	Optimal
Interwał	0:00	1,29%	82,47%	0,13%	1,40%	0,00%
	0:10	0,15%	61,73%	0,01%	0,00%	0,00%
	0:20	0,01%	36,19%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:30	0,00%	15,46%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:40	0,00%	4,42%	0,00%	0,00%	0,00%
	0:50	0,00%	0,78%	0,00%	0,00%	0,00%
	1:00	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%
	1:10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

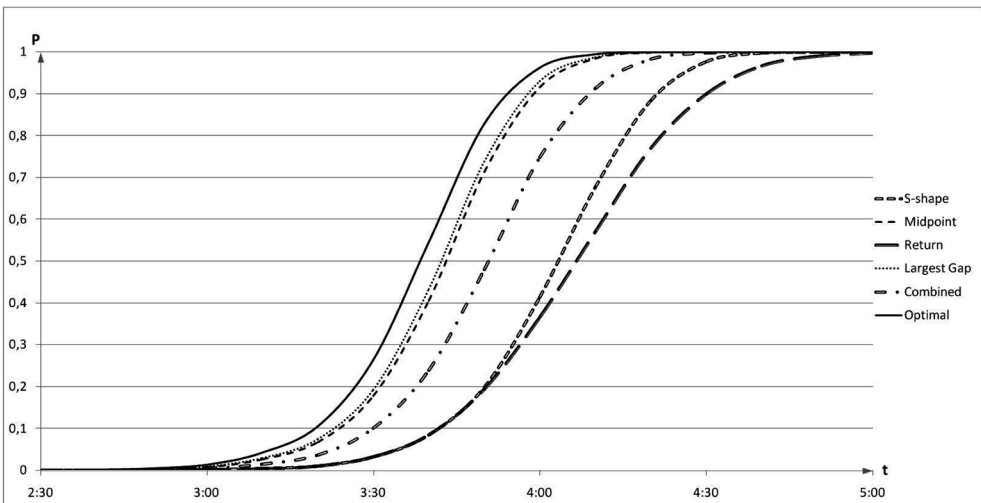
Źródło: opracowanie własne.

Rysunki 8-11 przedstawiają wykresy dystrybuanty czasu kompletacji dla różnych sposobów wyznaczania trasy magazyniera. Dla zamówień 10-elementowych prawdopodobieństwo kompletacji zamówienia w czasie nieprzekraczającym 3:50



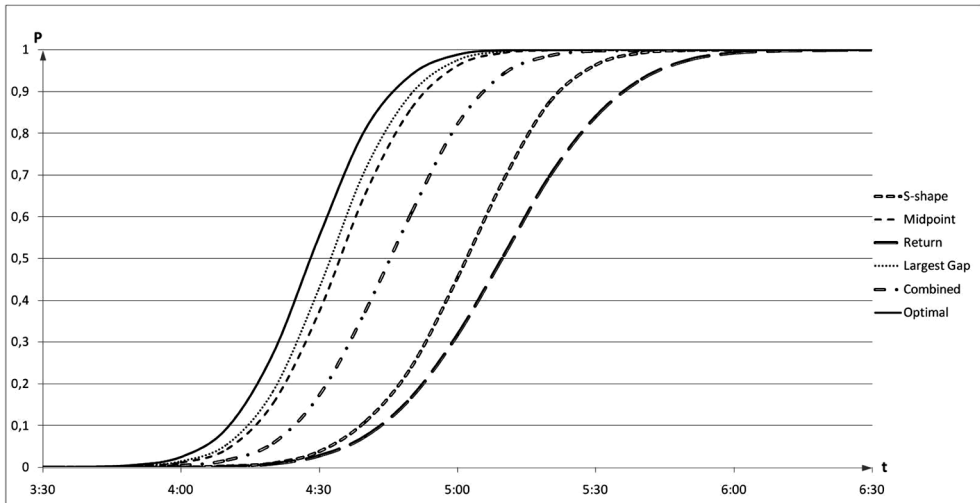
Rys. 8. Dystrybuanta czasu kompletacji zamówień zawierających 5 towarów (dla różnych sposobów poruszania się magazyniera)

Źródło: opracowanie własne.



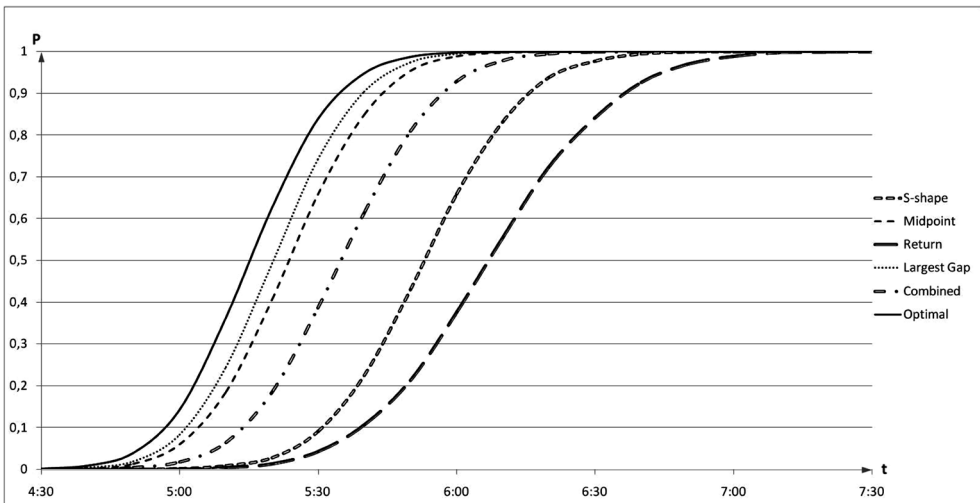
Rys. 9. Dystrybuanta czasu kompletacji zamówień zawierających 10 towarów (dla różnych sposobów poruszania się magazyniera)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Dystrybuanta czasu kompletacji zamówień zawierających 15 towarów (dla różnych sposobów poruszania się magazyniera)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Dystrybuanta czasu kompletacji zamówień zawierających 20 towarów (dla różnych sposobów poruszania się magazyniera)

Źródło: opracowanie własne.

jest najmniejsze podczas wykorzystywania metod *Return* i *S-Shape*. Wartości są niemal identyczne. Dopiero dla dłuższych czasów kompletacji metoda *Return* jest zdecydowanie gorsza od *S-Shape*.

Dla zamówień 5-elementowych krzywa dystrybuanty dla metody *Midpoint* niemal pokrywa się w krzywą wyznaczoną dla metody *Largest gap*. Dla większej liczby towarów przewaga metody *Largest gap* rośnie.

Krzywe dystrybuanty na wszystkich wykresach nie przecinają się. Można więc uszeregować metody poruszania się magazyniera od najlepszej do najgorszej. Dla każdego analizowanego przypadku porządek jest następujący: metoda optymalna, *Largest gap*, *Midpoint*, *Combined*, *S-Shape*, *Return*. Wartości dystrybuanty dla metod *Midpoint* i *Largest gap* są bardzo bliskie. Przy porównywaniu ze sobą pozostałych metod prawdopodobieństwa kompletacji zamówień w określonym czasie wykazują większe zróżnicowanie.

6. Wnioski

Zastosowanie technik symulacyjnych jest wprawdzie dość czasochłonne, umożliwia jednak precyzyjne określenie rozkładu prawdopodobieństwa czasu kompletacji zamówień dla różnych metod wyznaczania trasy magazyniera. W analizowanym przykładzie różnice w czasach kompletacji zamówień uzyskanych dla heurystyk i algorytmu Ratliffa i Rosenthala są niewielkie. Wynika to ze specyfiki badanej strefy kompletacji w rzeczywistym centrum logistycznym części i akcesoriów samochodowych. Większość przedmiotów umieszczonych na poziomach B-F ma niewielkie gabaryty, co pozwala na bardzo gęste ulokowanie ich na półkach. To powoduje, że droga pomiędzy dwoma towarami, które pobiera magazynier, jest bardzo często niewielka.

Wykresy dystrybuanty dla każdego analizowanego przypadku (5, 10, 15 i 20 towarów na zamówieniu) nie przecinają się. Oznacza to, że metody wyznaczania trasy magazyniera uszeregować można w sposób jednoznaczny od najlepszej do najgorszej, niezależnie od tego, czy porównywać będziemy średnie czasy kompletacji, czy też prawdopodobieństwo zakończenia tego procesu w dowolnym czasie. Wyznaczony porządek to: metoda optymalna, *Largest gap*, *Midpoint*, *Combined*, *S-Shape*, *Return*. Oczywiście nie oznacza to, że dla każdego zamówienia czasy jego kompletacji również można posortować rosnąco zgodnie z przedstawioną regułą. Tylko dla metody optymalnej – z oczywistych względów – wartości te zawsze będą najmniejsze. Nawet teoretycznie najgorsza metoda *Return* może w ściśle określonych warunkach (przy odpowiednim rozmieszczeniu towarów o większej rotacji) dawać bardzo dobre wyniki, co wykorzystuje się np. w połączeniu ze składowaniem towarów na podstawie klasyfikacji ABC.

W analizowanej strefie kompletacji rzeczywistego centrum logistycznego stosowana jest heurystyka *S-Shape*. Chociaż inne metody pozwalają na z pozoru stosunkowo niewielką redukcję czasu kompletacji (o około 10%), wydaje się, że są to oszczędności, których nie powinno się lekceważyć. Główny problem przy wdrożeniu metod wyznaczania trasy magazyniera innych niż stosowana aktualnie metoda

S-Shape stanowi czynnik ludzki. Magazynierzy wolą się poruszać intuicyjnie po wyuczonych trasach. Ewentualne ich pomyłki mogłyby zniweczyć korzyści z wdrożenia metody optymalnej lub heurystyki *Largest gap*. Pewnym rozwiązaniem tego problemu są nowoczesne systemy typu *pick-by-voice* i *pick-by-light*. Tutaj pojawiają się jednak trudności, jak np. wzrost liczby błędów kompletacji długo po wdrożeniu systemów, wynikające z automatyzacji czynności wykonywanych przez pracowników [*Voice picking sceptycznie...*].

W artykule autorzy skoncentrowali się na analizie efektywności różnych sposobów wyznaczania trasy magazynierów. Dla optymalizacji procesu kompletacji zamówień niezwykle istotne jest również prawidłowe składowanie towarów. Zagadnienie to nie było jednak przedmiotem zainteresowania autorów tekstu. Przegląd zagadnień związanych m.in. ze składowaniem towarów znajduje się w pracy [Wäscher 2004], a model optymalizujący zarówno składowanie, jak i kompletację – w artykule [Daniels, Rummel, Schantz 1998].

Literatura

- Chiang Y., Chen S., Wu K., *A Robust Approach for Improving Computational Efficiency of Order-Picking Problems*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 2005.
- Coyle J.J., Bardi E.J., Langley C.J., *Zarządzanie logistyczne*, PWE, Warszawa 2002.
- Daniels R.L., Rummel J.L., Schantz R., *A model of warehouse order picking*, "European Journal of Operational Research" 1998, 105, s. 1-17.
- De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K.J., *Design and control of warehouse order picking: A literature review*, "European Journal of Operational Research" 2007, 182(2), s. 481-501.
- De Koster R., Van Der Port E., *Routing orderpickers in a warehouse: A comparison between optimal and heuristic solutions*, IIE Transactions, 1998, 30, s. 469-480.
- Drury J., *Towards More Efficient Order Picking*, IMM Monograph No. 1, The Institute of Materials Management, Cranfield 1988.
- Hall R.W., *Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse*, IIE Transactions, 1993, 25(4), s. 76-87.
- Jacyna M., Kłodawski M., *Pracochłonność procesu komisjonowania dla wariantowego rozmieszczenia asortymentu w strefie kompletacji*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 70, Warszawa 2009.
- Korzeniowski A., *Zarządzanie gospodarką magazynową*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1997.
- Le-Duc T., *Design and control of efficient order picking processes*, PhD thesis, RSM Erasmus University, 2005.
- Petersen II C.G., *An evaluation of order picking routeing policies*, "International Journal of Operations & Production Management" 1997, vol. 17, iss.11, s. 1098 -1111.
- Ratliff H.D., Rosenthal A.S., *Orderpicking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem*, "Operations Research" 1983, 31, s. 507-521.
- Roodbergen K.J., De Koster, R., *Routing methods for warehouses with multiple cross aisles*, "International Journal of Production Research" 2001, 39(9), s. 1865-1883.
- Tarczyński G., *Warehouse Real-Time Simulator – How to Optimize Order Picking Time*, Working Paper, 2013, <http://ssrn.com/abstract=2354827>.

- Tompkins J.A., White J.A., Frazelle E.H. Tanchoco J.M.A., Trevino J., *Facilities Planning*, New York 2003.
- Van der Berg J., *A literature survey on planning and control of warehousing systems*, IIE Transactions, 1999, 31, s. 751-762.
- Voice picking sceptycznie. Czy kompletacja głosowa to na pewno pasmo samych sukcesów?*, <http://www.qsort.biz/voice-picking-sceptycznie.php>.
- Wäscher G., *Order picking: A survey of planning problems and methods*, "Supply Chain Management and Reverse Logistics" 2004, s. 323-347.

COMPARISON OF ORDER-PICKING TIMES FOR DIFFERENT ROUTING METHODS IN REAL LARGE LOGISTICS CENTRE

Summary: The paper presents a case study of one of the picking zones of real Polish logistics centre of automotive parts and accessories. The aim of the study was to compare the effectiveness of different order-picking methods. The work organization in the warehouse was briefly presented. Then different routing methods in the one block rectangular warehouse were described (heuristics and optimal algorithm). The paper compares different variants of order-picking process and presents their ranking. The graphs of cumulative distribution functions of order-picking time may help the survey. The analysis was based on real data. Calculations were performed using a simulation with the use of Warehouse Real-Time Simulator.

Keywords: order-picking, warehousing, simulations, case study.