

Marianna Jacyna*, Michał Kłodawski*

Matematyczny model kształtowania strefy komisjonowania

1. Wprowadzenie

Wspólnym celem wszystkich systemów komisjonowania jest maksymalizacja poprawności realizacji zleceń kompletacyjnych przy ograniczonych zasobach, takich jak np.: praca, urządzenia, pracownicy czy kapitał [4]. Dąży się, aby zamówienie było prawidłowo skompletowane pod względem asortymentowym oraz ilościowym, jak również dotarło do strefy wydań w określonym czasie, aby termin wysyłki do klienta nie został przekroczony. Proces kompletacji jest jedną z kluczowych determinant nie tylko kompletnych, ale i terminowych dostaw do klienta, co znajduje wyraz w wielu badaniach prowadzonych w zakresie. Szacuje się, że proces komisjonowania może pochłaniać nawet do 60% czasu przeznaczonego na wszystkie czynności magazynowe [3] oraz generować około 55% wszystkich kosztów operacyjnych przedsiębiorstwa (magazynu) [14]. Dlatego też w każdym systemie komisjonowania dąży się do zminimalizowania czasu realizacji zlecenia kompletacyjnego.

Analizując udział poszczególnych czynności w całkowitym czasie realizacji procesu komisjonowania, łatwo zauważyć, iż blisko połowę całego procesu stanowi czas przemieszczania pracownika realizującego czynności kompletacyjne. Należy również pamiętać o tym, iż czas poświęcony na przemieszczanie podczas realizacji zleceń klientów generuje bezpośrednie koszty, natomiast w żaden sposób nie zwiększa wartości dóbr dostarczanych do klientów. Stąd, minimalizacja tego czasu uważana jest za podstawowy etap w dążeniu do poprawy i zwiększania wydajności systemów komisjonowania. Jednym z czynników, który istotnie wpływa na wartość tego czasu, jest układ strefy komisjonowania.

W literaturze problemu, zagadnienie układu strefy komisjonowania dekomponowane jest na dwa odrębne przypadki. Pierwszy z nich skupia się na podjęciu decyzji, gdzie i jak rozmieścić poszczególne elementy strefy komisjonowania, tj. strefę przyjęć, pobrań, rezerw, sortowania, formowania itp. Drugi natomiast, zwany wewnętrznym problemem doboru układu strefy komisjonowania, dotyczy określenia liczby bloków regałowych, a także liczby i długości korytarzy roboczych w każdym z tych bloków. Istotnym aspektem tych

* Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych

rozważań jest decyzja dotycząca lokalizacji punktu zadawczo-pobraniowego (depot), czyli miejsca, z którego pobierane jest zlecenie kompletacyjne oraz w którym odkładana jest skompletowana jednostka ładunkowa.

W publikacjach [2, 11, 12, 13] zaproponowana została nieliniowa funkcja odwzorowująca długość drogi pokonywanej w trakcie realizacji zlecenia kompletacyjnego o określonej liczbie pozycji do pobrania przy znanej, całkowitej długości korytarzy roboczych. Jej wartość traktowana była jako kryterium doboru układu strefy komisjonowania. Analizę zależności kosztów eksploatacyjnych i nakładów dla dwu różnych rozwiązań organizacyjnych strefy komisjonowania o równoległych korytarzach roboczych przedstawili Bassan, Roll i Rosenblat w pracy [1]. Natomiast wpływ liczby zastosowanych korytarzy roboczych i ich długości na całkowity czas przemieszczania w trakcie procesu komisjonowania przy rozmieszczeniu artykułów wg metody losowej i metody volume-based przedstawił w postaci symulacyjnej Petersen w pracy [10]. W większości wspomniane pozycje dotyczą układów komisjonowania jednowymiarowego. W zakresie procesu kompletacji wielowymiarowej na uwagę zasługuje praca [9], w której Autorzy przedstawili model matematyczny wyznaczania czasu jazdy pracownika realizującego.

Na podstawie analiz literaturowych oraz własnych badań, w niniejszym artykule przedstawione zostanie sformułowanie problemu ukształtowania strefy komisjonowania ze względu na minimalizację czasu realizacji procesu kompletacji wielowymiarowej. W opracowanym modelu założono losowe rozmieszczenie artykułów w strefie komisjonowania oraz zastosowywano heurystyczną metodę doboru tras – metodę „S-shape”.

2. Sformułowanie modelu

2.1. Założenia do budowy modelu

Na potrzeby modelu obliczeniowego, służącego do wyznaczania czasu procesu kompletacji, będącego kryterium doboru układu strefy komisjonowania, przyjęto następujące założenia:

- Proces komisjonowania realizowany jest za pomocą wielofunkcyjnego wózka widłowego podnośnikowego, poruszającego się pomiędzy miejscami oferowania, z których pobierane są artykuły określone w realizowanym zleceniu,
- W analizowanej strefie kompletacji występuje jeden blok regałowy, równoległe korytarze robocze, oraz dwa korytarze poprzeczne. Miejsca oferowania artykułów rozmieszczone są po obu stronach korytarza roboczego oraz na różnych poziomach składowania.
- Punkt zadawczo-pobraniowy zlokalizowany jest w przednim korytarzu poprzecznym i może być umiejscowiony pomiędzy dowolną parą przyległych do siebie korytarzy roboczych lub na czole każdego z nich.
- Artykuły rozmieszczone są w strefie komisjonowania w sposób równomierny, według losowej metody rozmieszczenia. Dodatkowo w jednym miejscu oferowania może znajdować się tylko jeden rodzaj asortymentu.

- Wózki kompletacyjne poruszają się według heurystycznej metody „S-shape”. Oznacza to, że odwiedzane będą tylko te korytarze, w których znajduje się co najmniej jedna pozycja do pobrania (w przeciwnym wypadku korytarz jest pomijany). Wózki nie zmieniają kierunku jazdy w trakcie przemierzania korytarza, czyli jeżeli wjeżdżają do niego z jednej strony, to opuszczają go po stronie przeciwnej. Wyjątek stanowi sytuacja, gdy liczba korytarzy zawierających co najmniej jedną pozycję do pobrania jest nieparzysta. Wówczas ostatni z nich opuszczany i odwiedzany jest z tej samej strony. Ponadto założono, iż korytarze robocze w analizowanych układach strefy komisjonowania będą miały takie szerokości, które umożliwiają pobieranie artykułów z obu ich stron bez konieczności przemieszczania się wózka w kierunku poprzecznym.
- Wózki widłowe mogą podnosić i opuszczać kabinę z operatorem tylko podczas postoju.
- W modelu nierozważane są czasy przyspieszania i hamowania wózka wielofunkcyjnego. Autorzy przyjmują stałe prędkości poruszania się wózków.
- Czas realizacji procesu kompletacji dotyczyć będzie zestawienia pojedynczego średniego zlecenia kompletacyjnego o zadanie strukturze wierszy i pozycji do pobrania.

2.2. Oczekiwany czas realizacji procesu kompletacji

Wskaźnikiem oceny jakości rozwiązania w opracowanym modelu przyjęto oczekiwany czas realizacji procesu kompletacji $E[Tkom]$. Czas ten zależy od liczby i długości korytarzy roboczych, liczby poziomów składowania oraz lokalizacji punktu zdawczo-pobraniowego, co możemy zapisać następująco:

$$E[Tkom] \equiv T(k, n, g, ds) \quad (1)$$

Na oczekiwany czas ($E[Tkom]$) składa się oczekiwany czas jazdy wózka ($E[Tj]$), oczekiwany czas pobrań pozycji zawartych w zleceniu ($E[Tpob]$) oraz czas pozostały ($Tpoz$).

Oczekiwany czas jazdy to czas przemieszczania wózka w korytarzach roboczych i poprzecznych pomiędzy punktami pobrań towaru. Natomiast oczekiwany czas pobrań obejmuje czas niezbędny na takie czynności, jak: odnalezienie szukanych artykułów, podniesienie i opuszczanie kabiny wózka na odpowiedni poziom, pobranie odpowiedniej liczby artykułów, odłożenie ich na paletę (pojemnik, skrzynię itp.), sprawdzenie poprawności pobranych pozycji, odznaczenie na liście kompletacyjnej pobranych pozycji oraz odczytanie pozycji, jaka ma zostać pobrana w dalszej kolejności.

Czas pozostały odnosi się do czynności związanych z pobraniem listy kompletacyjnej do zrealizowania, odłożeniem gotowej jednostki skompletowanej w odpowiednim miejscu, oczekiwaniem na przydzielenie kolejnego zlecenia itp.

Zatem całkowity oczekiwany czas realizacji zlecenia kompletacyjnego zapisać możemy jako:

$$E[Tkom] = E[Tj] + E[Tpob] + Tpoz \quad (2)$$

Oczekiwany czas jazdy wózka w trakcie realizacji zlecenia kompletacyjnego zawiera dwie składowe: oczekiwany czas jazdy w korytarzach roboczych ($E[Tjr]$) oraz oczekiwany

czas jazdy w korytarzach poprzecznych ($E[Tjp]$) (uwzględniając czas przejazdu z punktu zdawczo-pobraniowego do pierwszego odwiedzanego korytarza i powrót z ostatniego korytarza do punktu zdawczo-pobraniowego). Wobec tego czas ten będzie równy:

$$E[Tj] = E[Tjr] + E[Tjp] \quad (3)$$

przy czym oczekiwany czas jazdy w korytarzach roboczych wynosi:

$$E[Tjr] = \frac{E[Dr]}{Vr} = \frac{l^* \cdot E[K] + C}{Vr} \quad (4)$$

Wartość oczekiwaną odległości przemierzanych wzdłuż korytarzy roboczych ($E[Dr]$), możemy wyznaczyć korzystając z zależności $E[Dr] = l^* \cdot E[K] + C$ [6], przy czym $l^* = l + sp$ określa długość korytarza roboczego powiększoną o podwojoną odległość od końca korytarza roboczego do środka korytarza poprzecznego. Parametr C oznacza dodatkową odległość pokonywaną w przypadku, gdy liczba korytarzy zawierających co najmniej jedną pozycję do pobrania jest nieparzysta. W takim przypadku (zgodnie z rozważaniami N.G. Halla, [5]), parametr C przyjmuje wartość równą l^* .

Zakładając, że asortyment jest rozłożony w regałach (korytarzach) w sposób losowy równomierny, możemy określić wartość oczekiwaną liczby korytarzy zawierających co najmniej jedną lokalizację, z której należy pobrać artykuły:

$$E[K] = k \cdot \left[1 - \left(\frac{k-1}{k} \right)^m \right] \quad (5)$$

Oczekiwany czas jazdy w korytarzach poprzecznych ($E[Tjp]$) będzie ilorazem wartości oczekiwanej drogi pokonywanej wzdłuż tych korytarzy ($E[Dp]$) oraz średniej prędkości jazdy wózka w korytarzu poprzecznym. Droga pokonywana w korytarzach poprzecznych to droga pokonywana z punktu zdawczo-pobraniowego do najbardziej wysuniętego w lewo korytarza roboczego, od którego pracownik rozpoczyna realizację zlecenia, droga pokonywana podczas zmian korytarzy roboczych oraz droga pokonywana od końca ostatniego odwiedzonego korytarza roboczego do punktu zdawczo-pobraniowego:

$$E[Tjp] = \frac{E[Dp]}{Vp} = \left(= srr \cdot \frac{\left(\left(k-1-2 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{i}{k} \right)^m \right) + \sum_{i=1}^k \left(|i-ds| + |i-(k-ds+1)| \cdot \left[\left(\frac{i}{k} \right)^m - \left(\frac{i-1}{k} \right)^m \right] \right) \right)}{Vp} \right) \quad (6)$$

gdzie i numer korytarza roboczego, $i \in \{1, 2, \dots, k\}$.

Szczegóły wyprowadzania wzoru na wartość oczekiwaną drogi pokonywanej wzdłuż korytarzy poprzecznych przedstawione zostały w pozycji [6].

Oczekiwany czas pobrań ($E[Tpob]$) możemy wyznaczyć z następującej zależności:

$$E[Tpob] = E[Tgd] + m \cdot (r \cdot tpob + tpot) + tw \cdot (m - 1) \quad (7)$$

Oczekiwany czas podnoszenia i opuszczania kabiny wózka ($E[Tgd]$) określany jest na podstawie zależności:

$$E[Tgd] = E[N] \left(\frac{hmo}{2} + (E[G] - 1) \cdot hmo \right) \cdot \left(\frac{1}{Vpod} + \frac{1}{op} \right) \quad (8)$$

gdzie:

- $E[G]$ – oczekiwane najwyżej położone miejsce oferowania (odwiedzane jako ostatnie) w kolumnie regałowej zawierającej co najmniej jedną pozycję do pobrania,
- $E[N]$ – oczekiwana liczba kolumn regałowych zawierających co najmniej jedno miejsce pobrania.

Z zależności (8) można wnioskować, że $E[Tgd]$ to $E[N]$ -krotna krotność czasu podniesienia kabiny operatora wózka na wysokość najwyżej położonego względem posadzki miejsca oferowania w danej kolumnie i opuszczenia kabiny do poziomu posadzki. We wzorze (8) uwzględniono również dodatkową wysokość ($0,5 hmo$) wynikającą z faktu, iż zakładamy, że w danej lokalizacji pobierane artykuły znajdują się w połowie jej wysokości. Natomiast oczekiwane najwyżej położone miejsce oferowania (odwiedzane jako ostatnie) w kolumnie regałowej zawierającej co najmniej jedną pozycję do pobrania $E[G]$ jest równe [9]:

$$E[G] = 0,5 + \sum_{j=1}^m g \cdot \left(\frac{j}{j+1} \right) \cdot \left[\frac{\binom{m}{j} \left(\frac{1}{n} \right)^j \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{m-j}}{1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^m} \right] \quad (9)$$

gdzie j numer odwiedzanego miejsca pobrania, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$.

- $\binom{m}{j} \left(\frac{1}{n} \right)^j \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{m-j}$ – reprezentuje dwumianowy rozkład prawdopodobieństwa odwiedzenia j -tej liczby miejsc pobrania w jednej z n kolumn regałowych,
- $1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^m$ – jest różnicą jedności i prawdopodobieństwa, że w danej kolumnie regałowej nie będzie żadnego miejsca niezbędnego do odwiedzenia.

Wartość stała $0,5$ zawarta we wzorze (9) wynika z faktu pobierania artykułów z połowy wysokości każdego miejsca oferowania, zatem artykuły z pierwszego poziomu nie są pobierane z wysokości posadzki (zerowa wysokość) lecz z wysokości $0,5hm$.

Wartość oczekiwaną liczby kolumn regałowych zawierających co najmniej jedno miejsce pobrania $E[N]$ można wyznaczyć podobnie jak $E[K]$, tj.:

$$E[N] = n \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^m \right] \quad (10)$$

Czas pozostały T_{poz} zawarty jest w nim czas niezbędny na pobranie przez pracownika listy kompletacyjnej, odczytanie pierwszego wiersza zlecenia oraz odłożenie skompletowanej jednostki w odpowiednim miejscu. W analizowanym modelu pomijany jest czas oczekiwania pracownika na przydzielenie mu kolejnego zlecenia do zrealizowania. Zatem czas pozostały możemy zapisać jako:

$$T_{poz} = t_{pz} + t_{ods} \quad (11)$$

3. Sformułowanie matematyczne problemu

Dla przedstawianego poniżej modelu doboru układu strefy komisjonowania kryterium oceny jakości rozwiązania przyjęto oczekiwany czas realizacji procesu kompletacji, który obejmuje:

- oczekiwany czas jazdy wózka ($E[T_j]$),
- oczekiwany czas pobrań pozycji zawartych w zleceniu ($E[T_{pob}]$),
- czas pozostały (T_{poz}).

Z uwagi na to, że zadanie dotyczy doboru układu strefy komisjonowania ze punktu widzenia minimalizacji czasu realizacji wielowymiarowego procesu kompletacji, celem będzie wyznaczenie:

- liczby poziomów składowania/oferowania w strefie komisjonowania,
- liczby korytarzy roboczych,
- liczby kolumn regałowych zawierających miejsca oferowania,
- numeru lokalizacji punktu zdawczo-pobraniowego.

Sformułowanie problemu możemy przedstawić następująco:

Dla danych:

- A – całkowita liczba lokacji niezbędnych do składowania/oferowania wszystkich rodzajów asortymentu,
- y – długość korytarza roboczego [m],
- m – średnia liczba wierszy w zleceniu (liczba miejsc niezbędnych do odwiedzenia),
- r – średnia liczba pozycji w wierszu (średnia liczba artykułów do pobrania w jednym miejscu oferowania),
- Y – długość całkowita wszystkich korytarzy roboczych [m],
- srr – odległość pomiędzy środkami dwóch przyległych korytarzy roboczych [m],
- sr – szerokość korytarza roboczego [m],

- sp – szerokość korytarza poprzecznego [m],
- smo – szerokość miejsca oferowania [m],
- hmo – wysokość miejsca oferowania [m],
- fmo – głębokość miejsca oferowania [m],
- Sx – maksymalna dopuszczalna długość strefy komisjonowania (oś x) [m],
- Sy – maksymalna dopuszczalna szerokość strefy komisjonowania (oś y) [m],
- H – maksymalna dopuszczalna wysokość strefy komisjonowania [m],
- Vr – średnia prędkość jazdy wózka w korytarzu roboczym [m/min],
- Vp – średnia prędkość jazdy wózka w korytarzu poprzecznym [m/min],
- $Vpod$ – średnia prędkość podnoszenia kabiny wózka [m/min],
- Vop – średnia prędkość opuszczania kabiny wózka [m/min],
- $tpob$ – średni czas pobrania jednego artykułu i odłożenia go na paletę (pojemnik) [min],
- tpz – średni czas pobrania pustego pojemnika (palety) i zlecenia kompletyjnego oraz odczytania jego pierwszego wiersza [min],
- tw – średni czas odczytania kolejnego wiersza zlecenia [min],
- $tpot$ – średni czas potwierdzenia pobrania wszystkich pozycji w danym wierszu [min],
- $tods$ – średni czas odstawienia jednostki skompletowanej [min],

należy wyznaczyć takie wartości zmiennych decyzyjnych dotyczących:

- liczby poziomów składowania/oferowania w strefie komisjonowania – g ,
- liczby korytarzy roboczych – k ,
- liczba kolumn regałowych zawierających miejsca oferowania – n ,
- numer lokalizacji punktu zdawczo-pobraniowego – ds

tak, aby funkcja kryterium postaci:

$$\begin{aligned}
 T(k, n, g, ds) = & \frac{I^* \cdot E[K] + C}{Vr} + \\
 & +srr \cdot \left(\frac{\left(\left(k-1-2 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{i}{k} \right)^m \right) + \sum_{i=1}^k \left(|i-ds| + |i-(k-ds+1)| \cdot \left[\left(\frac{i}{k} \right)^m - \left(\frac{i-1}{k} \right)^m \right] \right) \right)}{Vp} \right) + \\
 & + \left(\frac{hmo}{2} + (E[G]-1) \cdot hmo \right) \cdot \left(\frac{1}{Vpod} + \frac{1}{Vop} \right) \cdot n \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{n} \right)^m \right] + \\
 & + m \cdot (r \cdot tpob + tpot) + tw \cdot (m-1) + t_{pz} + t_{ods}
 \end{aligned} \tag{12}$$

przyjmowała wartości minimalne

przy następujących ograniczeniach:

- na wykorzystanie całkowitej długości wszystkich korytarzy roboczych

$$k \cdot y = Y \quad (13)$$

- na minimalną liczbę korytarzy roboczych

$$k \geq 1 \quad (14)$$

- na minimalną długość korytarzy roboczych

$$k \geq smo \quad (15)$$

- na możliwą lokalizację punktu zdawczo-pobraniowego

$$1 \leq ds \leq k \quad (16)$$

- na nieprzekroczenie dopuszczalne wysokości strefy komisjonowania

$$g \cdot hmo \leq H \quad (17)$$

- na nieprzekroczenie dopuszczalnej szerokości strefy komisjonowania (oś x)

$$k \cdot (sr + 2 \cdot fmo) \leq Sx \quad (18)$$

- na nieprzekroczenie dopuszczalnej długości strefy komisjonowania (oś y)

$$2 \cdot sp + y \leq Sy \quad (19)$$

4. Weryfikacja proponowanego podejścia

Weryfikacji proponowanego podejścia dokonano przy następujących stałych wartościach parametrów:

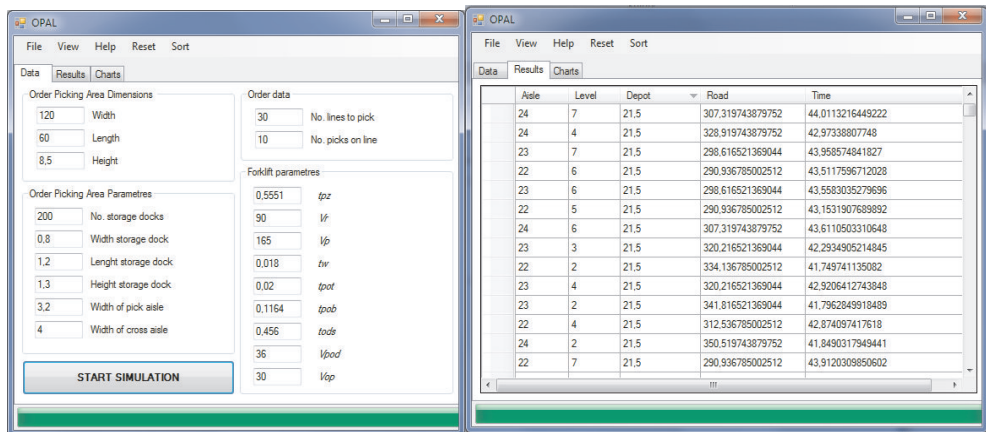
$sr = 3,2$ m	$Vp = 165$ m/min	$tpot = 0,02$ min
$sp = 4$ m	$Vr = 90$ m/min	$tods = 0,456$ min
$smo = 1,2$ m	$Vop = 30$ m/min	$tpob = 0,1164$ min
$hmo = 1,3$ m	$Vpod = 36$ m/min	$tpz = 0,5551$ min
$fmo = 0,8$ m		$tw = 0,018$ min

Ponadto założono, że w poszczególnych wariantach zmianie ulegały:

- dopuszczalne wymiary strefy komisjonowania,
- całkowita liczba lokacji niezbędnych do składowania/oferowania wszystkich rodzajów asortymentu,
- średnia liczba pozycji asortymentowych do pobrania w zleceniu.

Założono, iż średnia liczba pozycji w wierszu zlecenia komplekacyjnego będzie równa 10 ($r = 10$), natomiast wysokość strefy komisjonowania 8,5 m.

W ten sposób sformułowano osiem odrębnych wariantów, a w każdym z nich rozpatrywano cztery różne struktury list komplekacyjnych. Obliczenia czasu procesu kompletacji wielowymiarowej dla każdego z przygotowanych przypadków dokonane zostały z wykorzystaniem autorskiej aplikacji komputerowej opracowanej do tego celu (rys. 1). Przedstawiony poniżej rysunek prezentuje dwie główne i kluczowe zakładki aplikacji. W pierwszej z nich (*Data*) wprowadza się dane i ograniczenia dotyczące strefy komisjonowania, a także dodatkowe parametry pracy i urządzeń transportowych. Druga natomiast służy do prezentacji wyników w postaci tabelarycznej.



Rys. 1. Okna autorskiej aplikacji wykorzystanej do realizacji obliczeń i analiz

Na podstawie wyników z przeprowadzonych obliczeń wybrano te układy strefy komisjonowania, dla których czas był najkrótszy. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Po przeprowadzeniu analizy wyników zauważono niemal w każdym wariancie pewne trendy. Pierwsze spostrzeżenie dotyczy faktu, iż wraz ze wzrostem całkowitej liczby lokacji niezbędnych do składowania/oferowania wszystkich rodzajów asortymentu (A) rośnie również liczba korytarzy roboczych (k), przy której czas procesu kompletacji zlecenia jest najkrótszy. W znacznej mierze podyktowane jest to oczywiście koniecznością spełnienia ograniczenia na nieprzekroczenie dopuszczalnej długości strefy komisjonowania (19) przy jednoczesnym wzroście całkowitej długości wszystkich korytarzy roboczych i ograniczeniu na nieprzekroczenie dopuszczalnej wysokości strefy komisjonowania (17).

Należy zauważyć także, iż w analizowanych wariantach obliczeniowych wraz ze wzrostem średniej liczby wierszy w zleceniu (liczby miejsc niezbędnych do odwiedzenia – m) malała liczba poziomów oferowania w strefie komisjonowania. Zależność ta sugeruje dużą czasochłonność czynności związanych z podnoszeniem i opuszczaniem kabiny wózka w celu pobrania asortymentu. Dlatego dla wariantów z wielowierszowymi listami

kompletacji dobrano układy strefy komisjonowania z mniejszą liczbą poziomów oferowania (składowania).

W przypadku problemu lokalizacji punktu zdawczo-pobraniowego, czyli miejsca, w którym rozpoczyna się i kończy proces kompletacji, okazało się, iż najlepsze z punktu widzenia minimalizacji czasu kompletacji są lokalizacje znajdujące się blisko środka szerokości strefy. Jeżeli dokładniej przeanalizować konkretny przypadek dla pojedynczego zlecenia, byłyby to połowa odległości pomiędzy pierwszym i ostatnim odwiedzanym korytarem roboczym w trakcie realizacji tego zlecenia.

Tabela 1

Zestawienie układów strefy komisjonowania o najkrótszych czasach kompletacji zlecenia

Nr	Sx	Sy	A	m	k	g	d _s	E[Tkom]	Nr	Sx	Sy	A	m	k	g	d _s	E[Tkom]
Wariant 1	30	30	250	5	2	4	1,5	8,333	Wariant 5	80	60	750	5	8	4	4,5	8,911
	30	30	250	15	4	2	2,5	21,333		80	60	750	15	4	3	2	22,803
	30	30	250	25	4	2	2,5	34,000		80	60	750	25	4	3	2	35,898
	30	30	250	30	4	2	2,5	40,309		80	60	750	30	4	3	2	42,425
Wariant 2	30	30	500	5	6	3	4	8,7408	Wariant 6	80	60	1000	5	8	4	4,5	9,127
	30	30	500	15	6	3	4	22,383		80	60	1000	15	4	3	2,5	23,352
	30	30	500	25	6	3	4	35,430		80	60	1000	25	4	3	2,5	36,475
	30	30	500	30	6	3	4	41,921		80	60	1000	30	4	3	2,5	43,020
Wariant 3	60	40	250	5	2	3	2	8,285	Wariant 7	80	60	1500	5	8	5	4,5	9,485
	60	40	250	15	2	3	2	21,329		80	60	1500	15	8	5	4,5	9,485
	60	40	250	25	4	2	2	34,00		80	60	1500	25	6	3	8,5	24,161
	60	40	250	30	4	2	2	40,309		80	60	1500	30	6	3	3,5	37,845
Wariant 4	60	40	500	5	8	3	4,5	8,66	Wariant 8	80	60	2500	5	8	6	5	10,058
	60	40	500	15	4	3	2,5	22,184		80	60	2500	15	16	4	9	25,287
	60	40	500	25	6	2	4	35,144		80	60	2500	25	6	5	4	39,769
	60	40	500	30	6	2	3,5	41,499		80	60	2500	30	8	4	4,5	46,596

Źródło: opracowanie własne

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy. Projekt N N509 601839 pt. „Metodyka kształtowania sieci transportowo-logistycznej w wybranych obszarach”.

Literatura

- [1] Bassan Y., Roll Y., Rosenblat M.J., *Internal layout design of a warehouse*. AIIE Transactions, 1980.
- [2] De Koster R., Le Duc T., Rootbergen K., *Design and control of warehouse order picking: a literature review*. Erasmus University Rotterdam, Rotterdam 2006.
- [3] Drury J., *Towards more efficient order picking*. The Institute of Materials Management, Cranfield, U.K., 1988.
- [4] Geotchalckx M., Ashayeri J., *Classification and design of order picking systems*. Logistics World, 1989.
- [5] Hall N.G., *Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse*. IIE Transactions, 25, 1993.
- [6] Kłodawski M., Jacyna M., *Wpływ układu strefy komisjonowania na długość drogi kompletowania*. Logistyka 04/2010, s. 18, artykuł na CD.
- [7] Korzeń Z., *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania, tom II*. Biblioteka Logistyczna.
- [8] Niemczyk A., *Zapasy i magazynowanie, tom II*. Biblioteka Logistyczna, Poznań 2006.
- [9] Parikh P.J., Meller R.D., *A travel-time model for a person-onboard order picking system*. European Journal of Operational Research, 200, 2010.
- [10] Petersen C.G., *Consideration in order picking zone configuration*. International Journal of Operations & Production Management, 2002.
- [11] Roodbergen K.J., Sharp G.P., Vis I. F.A., *Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouse*. IIE Transactions, 40, 2008.
- [12] Roodbergen K.J., De Koster R., *Routing methods for warehouses with a multiple cross aisles*. European Journal of Production Research, 2001.
- [13] Roodbergen K.J., De Koster R., *Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle*. European Journal of Operational Research, 2001.
- [14] Tompkins J.A., White J.A., Bozer Y.A., Frazelle E.H., Tanchoco J.M.A., *Facilities planning*. 2003.