

PRACE NAUKOWE

Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

RESEARCH PAPERS

of Wrocław University of Economics

Nr 446

Metody i zastosowania badań operacyjnych



Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
Wrocław 2016

Redakcja wydawnicza: Joanna Świrska-Korlub

Redakcja techniczna: Barbara Łopusiewicz

Korekta: Barbara Cibis

Łamanie: Małgorzata Myszkowska

Projekt okładki: Beata Dębska

Informacje o naborze artykułów i zasadach recenzowania
znajdują się na stronach internetowych

www.pracnaukowe.ue.wroc.pl

www.wydawnictwo.ue.wroc.pl

Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons

Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 3.0 Polska
(CC BY-NC-ND 3.0 PL)



© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Wrocław 2016

ISSN 1899-3192
e-ISSN 2392-0041

ISBN 978-83-7695-610-7

Wersja pierwotna: publikacja drukowana

Zamówienia na opublikowane prace należy składać na adres:

Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław

tel./fax 71 36 80 602; e-mail: econbook@ue.wroc.pl

www.ksiegarnia.ue.wroc.pl

Druk i oprawa: TOTEM

Wstęp

Wstęp	7
Krzysztof Echaust: Modelowanie wartości ekstremalnych stóp zwrotu na podstawie danych śróddziennych / Modeling of extreme returns on the basis of intraday data	9
Helena Gaspars-Wieloch, Ewa Michalska: On two applications of the Omega ratio: $\max\Omega_{\min}$ and $\Omega(H+B)$ / O dwóch zastosowaniach wskaźnika Omega: $\max\Omega_{\min}$ i $\Omega(H+B)$	21
Agata Gluzicka: Zastosowanie modelu MAD z dodatkowymi warunkami ograniczającymi / Application of the MAD model with additional constraints	37
Dorota Górecka, Małgorzata Szalucka: Foreign market entry mode decision – approach based on stochastic dominance rules versus multi-actor multi-criteria analysis / Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – podejście oparte na dominacjach stochastycznych a wieloaktorska analiza wielokryterialna	47
Paweł Hanczar, Dagmara Pisiewicz: Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej / Reverse logistics – optimization of flows in the system of waste management	70
Michał Jakubiak, Paweł Hanczar: Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków / Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes on the example of MPO Cracow	83
Michał Kameduła: Zastosowanie koewolucyjnego algorytmu genetycznego w rozwiązaniu zadania trójkryterialnego / Application of co-evolutionary genetic algorithm for a three-criterion problem.....	93
Donata Kopańska-Bródka, Renata Dudzińska-Baryła, Ewa Michalska: Zastosowanie funkcji omega w ocenie efektywności portfeli dwuskładnikowych / Two-asset portfolio performance based on the omega function .	106
Marek Kośny, Piotr Peternek: Zagadnienie sposobu definiowania preferencji na przykładzie przydziału uczniów do oddziałów klasowych / Definition of preferences in the context of pupils' allocation to classes	115
Wojciech Młynarski, Artur Prędki: Ocena efektywności technicznej i finansowej wybranych nadleśnictw Lasów Państwowych za pomocą metody DEA / Technical and financial efficiency evaluation for selected forestry managements of the State Forests National Forest Holding – the DEA approach.....	126

Piotr Namieciński: Alternatywna metoda określania preferencji decydenta w zagadnieniach wielokryterialnych / Alternative methods of decision-maker preferences identification in multicriteria issues	144
Marek Nowiński: Testowanie nieliniowych algorytmów optymalizacyjnych – zestaw funkcji typu <i>benchmark</i> / Testing nonlinear optimization algorithms – set of benchmark type functions	159
Agnieszka Przybylska-Mazur: Wybrana metoda analizy długoterminowej stabilności finansów publicznych / The selected method of analysis of the long-term sustainability of public finance	173
Ewa Roszkowska, Tomasz Wachowicz, Robert Jankowski: Analiza porozumienia końcowego w negocjacjach elektronicznych w kontekście zgodności systemu oceny ofert negocjatora z informacją preferencyjną/ Analyzing the negotiation agreements in a context of concordance of negotiation offer scoring systems with negotiators' preferential information	187
Aleksandra Sabo-Zielonka, Grzegorz Tarczyński: Adaptacja heurystyki <i>s-shape</i> na potrzeby wyznaczenia trasy przejścia w niestandardowym układzie strefy kompletacji zamówień / Adaptation of the s-shape heuristic for the custom layout of the order-picking zone	207
Jakub Staniak: Inicjalizacja ukrytych modeli Markowa z wykorzystaniem analizy skupień / Initialization of hidden Markov models by means of clustering analysis.....	224
Paulina Szterlik: Lokalizacja magazynu centralnego z zastosowaniem metod wielokryterialnych / Location of central warehouse using quantitative research	237
Grzegorz Tarczyński: Porównanie efektywności kompletacji łączonych zleceń z kompletacją niezależną / An attempt of comparison of order batching with independent order-picking	250

Wstęp

Kolejna, XXXIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, organizowana corocznie przez najważniejsze ośrodki naukowe zajmujące się dziedziną badań operacyjnych, w roku 2015 odbyła się w pięknym, zabytkowym i świeżo odremontowanym zespole pałacowo-parkowym w Łagowie koło Zgorzelca. Konferencję zrealizowaną pod nazwą *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* przygotowała Katedra Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu pod kierownictwem dr. hab. Marka Nowińskiego, prof. UE.

Konferencje te mają już długoletnią tradycję – są to coroczne spotkania pracowników nauki specjalizujących się w badaniach operacyjnych. Głównym celem konferencji było, podobnie jak w latach ubiegłych, stworzenie (przede wszystkim dla młodych teoretyków, a także praktyków dyscypliny) forum wymiany myśli na temat najnowszych osiągnięć dotyczących metod ilościowych wykorzystywanych do wspomagania procesów podejmowania decyzji, a także prezentacja nowoczesnych zastosowań badań operacyjnych w różnych dziedzinach gospodarki. Ten cenny dorobek naukowy nie może być zapomniany i jest publikowany po konferencji w postaci przygotowywanego przez organizatorów zeszytu naukowego zawierającego najlepsze referaty na niej zaprezentowane.

W pracach Komitetu Naukowego Konferencji uczestniczyli czołowi przedstawiciele środowisk naukowych z dziedziny badań operacyjnych w Polsce; byli to: prof. Jan B. Gajda (Uniwersytet Łódzki), prof. Stefan Grzesiak (Uniwersytet Szczeciński), prof. Bogumił Kamiński (SGH w Warszawie), prof. Ewa Konarzewska-Gubała (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), prof. Donata Kopańska-Bródka, prof. Maciej Nowak i prof. Tadeusz Trzaskalik (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach), prof. Dorota Kuchta (Politechnika Wrocławska), prof. Krzysztof Piasecki (Uniwersytet w Poznaniu) i prof. Józef Stawicki (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Zakres tematyczny konferencji obejmował teoretyczne i praktyczne zagadnienia dotyczące przede wszystkim:

- modelowania i optymalizacji procesów gospodarczych,
- metod wspomagających proces negocjacji,
- metod oceny efektywności i ryzyka na rynku kapitałowym i ubezpieczeniowym,
- metod ilościowych w transporcie i zarządzaniu zapasami,
- metod wielokryterialnych,
- optymalizacji w zarządzaniu projektami oraz analizy ryzyka decyzyjnego.

W konferencji wzięło udział 43 przedstawiciele różnych środowisk naukowych, licznie reprezentujących krajowe ośrodki akademickie. W trakcie sześciu sesji ple-

narych, w tym dwóch sesji równoległych, przedstawiono 27 referatów, których poziom naukowy w przeważającej części był bardzo wysoki. Zaprezentowane referaty, po pozytywnych recenzjach, zostają dziś opublikowane w Pracach Naukowych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu w postaci artykułów naukowych w specjalnie wydany zeszycie konferencyjnym.

Przypominając przebieg konferencji, nie można nie wspomnieć o konkursie zorganizowanym dla autorów referatów niebędących samodzielnymi pracownikami nauki. Dotyczył on prezentacji najciekawszego zastosowania badań operacyjnych w praktyce gospodarczej. Komitet Organizacyjny Konferencji powołał kapitułę konkursu, w której skład weszli: prof. Ewa Konarzewska-Gubała – przewodnicząca, prof. Jan Gajda, prof. Stefan Grzesiak i prof. Donata Kopańska-Bródka. Członkowie Komisji Konkursowej oceniali referaty ze względu na:

- innowacyjność, oryginalność metody będącej przedmiotem zastosowania,
- znaczenie zastosowania dla proponowanego obszaru,
- stopień zaawansowania implementacji metody w praktyce.

Spośród 15 referatów zgłoszonych wyróżniono: 1. miejsce: dr Michał Jakubiak i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków*; 2. miejsce: mgr Dagmara Piesiewicz i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej*; 3. miejsce: dr Dorota Górecka i dr Małgorzata Szałucka (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu), *Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – wieloaktorska analiza wielokryterialna a podejście oparte na dominacjach stochastycznych*.

Przy okazji prezentowania opracowania poświęconego XXXIV Konferencji *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* i jej bardzo wartościowego dorobku nie możemy nie podziękować członkom Komitetu Organizacyjnego Konferencji, w którego skład wchodził młodzi, acz doświadczeni pracownicy Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu: dr Piotr Peternek (sekretarz), dr hab. Marek Kośny, dr Grzegorz Tarczyński oraz mgr Monika Stańczyk (biuro konferencji). Zapewnili oni w sposób profesjonalny sprawne przygotowanie i przeprowadzenie całego przedsięwzięcia oraz zadbał o sprawy administracyjne związane z realizacją konferencji, a także byli odpowiedzialni za dopilnowanie procesu gromadzenia i redakcji naukowych materiałów pokonferencyjnych, które mamy okazję Państwu dziś udostępnić.

Już dzisiaj cieszymy się na nasze kolejne spotkanie w ramach jubileuszowej XXXV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, która tym razem będzie organizowana przez naszych przyjaciół z Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu pod kierownictwem prof. dr. hab. Krzysztofa Piaseckiego.

Marek Nowiński

Grzegorz Tarczyński

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: grzegorz.tarczyński@ue.wroc.pl

PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI KOMPLETACJI ŁĄCZONYCH ZLECEŃ Z KOMPLETACJĄ NIEZALEŻNĄ

AN ATTEMPT OF COMPARISON OF ORDER BATCHING WITH INDEPENDENT ORDER-PICKING

DOI: 10.15611/pn.2016.446.18

JEL Classification: C61

Streszczenie: W pracy omówiono zalety i wady kompletacji niezależnej oraz kompletacji łączonych zleceń. Z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych oraz podejścia analitycznego porównano efektywność każdego z ujęć. Analizie poddano szeroko opisywane w literaturze magazyny prostokątne jednoblokowe, w których punkt przyjęcia i wydania towarów umieszczony jest w rogu. Przyjęto również, że trasa, po której porusza się magazynier, wyznaczana jest zgodnie z heurystyką *s-shape*. Rozważono dwa podstawowe sposoby łączenia zleceń opisane w literaturze: oparty na bliskości lokalizacji kompletowanych wyrobów oraz bazujący na oknach czasowych. Przeprowadzone badania wskazują, że samo połączenie zamówień przynosi znaczącą redukcję czasu kompletacji, ale jego optymalizacja nieraz podwaja te korzyści. W artykule zaproponowano, aby czas przeznaczony na sortowanie powiązać z czasem, który magazynierowi zajmuje przejście alejki z towarami.

Słowa kluczowe: magazynowanie, kompletacja towarów, kompletacja łączonych zleceń, symulacje.

Summary: The paper describes the advantages and disadvantages of independent order-picking and order batching. The effectiveness of each approach was compared using simulations and analytical approach. Two criteria of order batching was considered: the proximity of pick locations and time windows. The studies indicate that order batching significantly reduces order-picking time, but the optimization of this process often doubles these benefits. The paper proposes that the sorting time should be associated with the time needed by the picker for crossing the picking aisle.

Keywords: warehousing, order-picking, order batching, simulations.

1. Wstęp

Optymalizacja procesów magazynowych obejmuje kilka elementów. Krótsze czasy kompletacji zamówień można uzyskać dzięki właściwemu kształtowi strefy kompletacyjnej, odpowiedniej lokalizacji punktu przyjęcia i wydania towarów, prawidłowemu wyborowi heurystyki wyznaczania trasy magazyniera, lokalizacji towarów szybko rotujących, ale również przez przekształcanie zamówień w listy kompletacyjne (jeszcze inny problem rozpatrują [Dmytrów, Doszyń 2015], analizujący wybór lokalizacji, z których należy pobierać wyroby). Problemy optymalizacji procesu kompletacji omówione są m.in. w pracach [Krawczyk, Jakubiak 2011; Dmytrów 2013; Sabo 2013; Kłodawski 2012; Garbacz, Łopuszyński 2015; Tarczyński 2012, 2013b].

Artykuł koncentruje się wokół ostatniej z wymienionych opcji. Kompletacja pojedynczych zamówień, zwana też kompletacją niezależną, konfrontowana jest z kompletacją zleceń łączonych.

Łączenie zamówień niesie ze sobą wiele korzyści, ale też zagrożenia. Krawczyk [2011] wymienia podstawowe wady i zalety kompletacji niezależnej oraz kompletacji zleceń łączonych. Zalety kompletacji niezależnej to: dokładność obsługi zlecenia, wstępne przygotowanie zestawu docierającego do strefy wydań do pakowania i oznakowania oraz ułatwiona kontrola poprawności wykonania zlecenia i operacji rozliczeniowych. Do wad tego rozwiązania zalicza się: słabą efektywność wykorzystania urządzeń i czasu pracy osób oraz możliwość występowania kolizji w miejscach częstego pobierania produktów. Z kolei do zalet kompletacji zleceń łączonych należą zmniejszenie liczby przejazdów do miejsc pobierania produktów i efektywniejsze wykorzystanie urządzeń i czasu pracy. Wadami tego podejścia zaś są: przeniesienie operacji właściwego kompletowania do strefy wydań i ryzyko związane z tym, że zgrupowane zlecenia mogą być zbyt duże do pobrania w jednym cyklu.

Sharp, Choe, Yoon [1991] podają dwa kryteria łączenia zamówień: bliskość lokalizacji towarów i okna czasowe. Dla pierwszego zagadnienia możliwe jest różne definiowanie optymalizowanego kryterium. Może to być: minimalizacja maksymalnego czasu realizacji łączonego zlecenia [Gademann, Van Den Berg, Van Der Hoff 2001], minimalizacja średniego czasu kompletacji zamówień [Gademann, Velde 2005], maksymalizacja poziomu podobieństwa zamówień [Chen, Wu 2005]. De Koster, Le Duc i Roodbergen [2007] zwracają uwagę, że zagadnienia te są dla większych problemów nierozwiązywalne (NP trudne), z tego powodu do łączenia zamówień stosuje się heurystyki.

2. Założenia przyjęte w modelu

W badaniach rozpatrywany jest magazyn prostokątny tzw. jednoblokowy, czyli taki w którym równoległe alejki, gdzie składowane są towary, przedzielone są dwoma poprzecznymi korytarzami. Magazyny tego typu są najczęściej opisane w literatu-

rze. Zakłada się, że towary rozmieszczone są na regałach w sposób losowy, a punkt przyjęcia i wydania towarów znajduje się w rogu magazynu.

Trasa magazyniera wyznaczana jest zgodnie z najczęściej stosowaną w praktyce heurystyką *s-shape*. Magazynier wchodzi tylko do tych alejek, gdzie znajdują się towary, które ma pobrać. W podejściu analitycznym przyjmuje się dla uproszczenia, że dla każdej alejki, w której znajduje się potrzebny towar, jej dystans pokonywany jest w całości. W rzeczywistości tylko w ostatniej alejce magazynier może przejść również dystans krótszy bądź dłuższy od jej długości (por. [Tarczyński 2015b]). Wyjątek ten uwzględniony został w symulacjach komputerowych.

Na potrzeby badań analitycznych w punkcie 4 wyprowadzane są wzory na średnie odległości pokonywane przez magazyniera podczas procesu kompletacji zamówień, dla symulacji przyjęto zaś minimalną liczbę replikacji na poziomie 10 000.

3. Tworzenie zamówień łączonych

Analizie poddane zostały dwa algorytmy łączenia zamówień: oparty na oknach czasowych i minimalizujący liczbę odwiedzanych przez magazyniera alejek. Dla pierwszego z nich łączone są losowe zamówienia. Dla drugiego dla losowo wybranego zamówienia poszukuje się takiego, którego dodanie do niego spowoduje minimalny przyrost liczby alejek z towarami do pobrania.

W tym celu najpierw wektory zamówień z_i przekształca się na binarne wektory x_p , których wymiar równy jest liczbie alejek w magazynie, a składowe informują w których alejkach znajdują się potrzebne towary. Przykładowo dla magazynu, w którym jest 15 alejek, wektor $z_i^T = [53; 68; 80; 252; 323; 359; 452]$ (liczby oznaczają numery lokalizacji, które muszą być odwiedzone przez magazyniera, przyjęto po 40 lokalizacji w każdej alejce) może zostać przekonwertowany na $z_i^T = [0; 1; 0; 0; 0; 0; 1; 0; 1; 0; 0; 1; 0; 0; 0]$ (potrzebne towary znajdują się w 2, 7, 9 i 12 alejce – jedynki na odpowiednich składowych wektora).

Formalny zapis algorytmu łączenia zamówień ma postać:

wyberz losowo i ,

$$k = \arg \min_{l \neq i} f(x_i, x_l),$$

$$f(x_i, x_l) = \sum_n \max\{x_{i,n}; x_{l,n}\},$$

połącz zamówienia z_i i z_k .

4. Szacowanie średniego czasu kompletacji zamówień

Średnie czasy kompletacji zamówień dla różnych parametrów magazynu i wielkości list kompletacyjnych mogą być wyznaczane zarówno za pomocą symulacji komputerowych, jak i w sposób analityczny. Przedmiotem badań są zamówienia pojedyn-

cze oraz zamówienia łączone zarówno w ramach okien czasowych, jak i z wykorzystaniem algorytmu minimalizującego liczbę odwiedzianych przez magazyniera alejek (podczas jednego cyklu kompletacyjnego). Dla dwóch pierwszych przypadków możliwe jest wyznaczenie w prosty sposób średnich czasów kompletacji w sposób analityczny. Ponieważ najważniejszym elementem różnicującym porównywane warianty decyzyjne jest dystans pokonany w alejkach, w których przechowywane są towary, analiza ograniczona zostanie do wyznaczenia liczby alejek, do których wejdzie magazynier (sposób wyznaczenia odległości pokonywanej przez magazyniera z głównych korytarzach opisany jest w pracy [Tarczyński 2015a]).

W modelu przyjęto założenie, że magazynier wchodzi tylko do tych alejek, w których składowane są towary znajdujące się na liście kompletacyjnej. Po wejściu do alejki zawsze pokonywana jest cała jej długość, a magazynier opuszcza ją drugim wejściem. Kluczowa jest więc odpowiedź na pytanie, w ilu alejkach znajdują się potrzebne towary. Stosując pewne uproszczenie, które w bardzo niewielkim stopniu zaburza rozwiązanie, można do analizy wykorzystać rozkład dwumianowy (losowanie ze zwracaniem). Wówczas wartość oczekiwana liczby alejek x , do których wejdzie magazynier, jeśli na liście kompletacyjnej znajduje się n towarów równa jest:

$$\begin{aligned} E(x|n) &= \sum_{j=1}^N P(\text{magazynier wejdzie do } j\text{-tej alejki}) = \\ &= \sum_{j=1}^N (1 - (1 - P_j)^n), \end{aligned}$$

gdzie: P_j – prawdopodobieństwo wejścia do j -tej alejki, N – liczba alejek w magazynie.

Jeżeli towary rozmieszczone są w magazynie w sposób losowy, to można przyjąć, że prawdopodobieństwo pobrania towaru z każdej alejki jest takie samo: $\Lambda_j: P_j = \frac{1}{N}$. Wówczas wzór ulega uproszczeniu do postaci:

$$E(x|n) = N \cdot \left(1 - \left(\frac{N-1}{N}\right)^n\right).$$

W przypadku łącznej kompletacji k zamówień, z których każde złożone jest z n towarów, otrzymujemy:

$$E(x|k \cdot n) = N \cdot \left(1 - \left(\frac{N-1}{N}\right)^{k \cdot n}\right).$$

Łączna kompletacja wielu zamówień wiąże się z koniecznością późniejszego posortowania towarów. Jeśli założymy, że czas potrzebny na posortowanie wyrobów zależy od liczby kompletowanych równocześnie zamówień i przyjmijmy, że

jest proporcjonalny do czasu przejścia przez magazyniera przez alejkę, to możliwe będzie poszukiwanie optymalnej liczby łączonych zamówień:

$$f(k) = \frac{N}{k} \cdot \left(1 - \left(\frac{N-1}{N} \right)^{k \cdot n} \right) + (k-1) \cdot d \rightarrow \min,$$

$$k \in \mathbb{C}, k \geq 1, n \in \mathbb{C}, n \geq 1, N \in \mathbb{C}, N \geq 1, d \geq 0,$$

gdzie: d – współczynnik sortowania (wielokrotność długości alejki, którą pokonuje magazynier podczas dodatkowego czasu przeznaczanego na sortowanie towarów po dodaniu do listy kompletacyjnej kolejnego zamówienia).

Funkcja $f(k)$ wyraża średnią liczbę alejek, przez które przechodzi magazynier podczas procesu kompletacji (z uwzględnieniem sortowania towarów), przypadającą na jedno zamówienie.

Uzależnienie czasu sortowania towarów od czasu przejścia przez magazyniera przez alejkę jest bardziej uniwersalne niż wyrażanie jej w wartościach nominalnych. Dzięki temu zabiegowi przeprowadzona analiza będzie niezależna od długości alejek, która w wielu magazynach może być znacznie zróżnicowana.

5. Wyniki obliczeń

Z wykorzystaniem programu Warehouse Real-Time Simulator [Tarczyński 2013a] przeprowadzono symulacje komputerowe, których wyniki zawierają tab. 1-6.

W tabeli 1 znajdują się średnie czasy kompletacji zleceń pojedynczych i łączonych dla magazynu z 10 alejkami i 40 półkami w regale oraz różnych wielkości zamówień. Przedstawione wartości nie uwzględniają czasu niezbędnego na późniejsze posortowanie towarów. Połączenie dwóch zamówień w ramach okna czasowego (bez optymalizacji) spowodowało skrócenie średniego czasu kompletacji przypadającego na jedno zamówienie od 20,4% do 28%. Dołożenie kolejnego zamówienia spowodowało kolejne oszczędności czasowe – równoczesna kompletacja trzech zamówień implikuje redukcję czasu od 31,7% do 43,4% względem kompletacji zleceń pojedynczych. Dwie ostatnie kolumny w tabeli (oznaczone gwiazdką) przedstawiają wyniki dla zamówień łączonych według kryterium minimalizacji liczby odwiedzonych alejek. Tutaj oszczędność względem zamówień kompletowanych osobno wynosi około 38% dla zamówień podwójnych i aż 53% dla zamówień potrójnych.

W tabeli 2 podano średnią liczbę alejek odwiedzanych przez magazyniera w omawianych wariantach decyzyjnych. Połączenie dwóch zamówień powoduje, że liczba alejek, przez które przechodzi magazynier, wzrasta o 39%-72% dla okien czasowych, ale tylko o około 10% przy uwzględnieniu algorytmu zmniejszającego liczbę alejek. Dołożenie trzeciego zamówienia powoduje w pierwszym wariantcie przyrost o 15-54 punkty procentowe, a w drugim wariantcie tylko o kolejne 1-5pp.

Odpowiednie wyniki dla magazynu z 15 alejkami oraz 40 i 60 półkami znajdują się w tab. 3-6.

Tabela 1. Średnie czasy kompletacji zamówień pojedynczych i łączonych w magazynach z 10 alejkami i 40 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent czasu kompletacji zamówienia pojedynczego)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	6:27 (100%)	10:15 (159,18% / 2 = 79,59%)	13:12 (204,82% / 3 = 68,27%)	8:00 (124,11% / 2 = 62,06%)	8:59 (139,48% / 3 = 46,49%)
	5	9:07 (100%)	14:01 (153,72% / 2 = 76,86%)	17:22 (190,44% / 3 = 63,48%)	11:11 (122,65% / 2 = 61,32%)	12:51 (140,78% / 3 = 46,93%)
	7	11:20 (100%)	16:51 (148,62% / 2 = 74,31%)	20:16 (178,79% / 3 = 59,60%)	13:59 (123,28% / 2 = 61,64%)	16:00 (141,08% / 3 = 47,03%)
	9	13:11 (100%)	18:59 (143,98% / 2 = 71,99%)	22:24 (169,83% / 3 = 56,61%)	16:21 (124,01% / 2 = 62,00%)	18:29 (140,15% / 3 = 46,72%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Średnie liczby odwiedzanych alejek podczas jednego cyklu kompletacyjnego w magazynach z 10 alejkami i 40 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent liczby odwiedzanych alejek przy kompletacji zamówień pojedynczych)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	2,71 (100%)	4,67 (172%)	6,12 (226%)	2,98 (110%)	3,01 (111%)
	5	4,09 (100%)	6,51 (159%)	7,94 (194%)	4,53 (111%)	4,70 (115%)
	7	5,22 (100%)	7,74 (148%)	8,90 (170%)	5,76 (110%)	5,99 (115%)
	9	6,13 (100%)	8,51 (139%)	9,41 (154%)	6,69 (109%)	6,91 (113%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że łączenie zamówień w ramach okien czasowych powoduje znaczne oszczędności czasowe. Zamówienia połączone z uwzględnieniem algorytmu zmniejszającego liczbę odwiedzanych alejek prowadzi do dalszej redukcji czasu. Dzieje się tak dlatego, że magazynier, kompletując

zlecenia łączone, pokonuje tylko niewiele większy dystans niż podczas kompletacji pojedynczych zleceń. Należy jednak pamiętać, że przeprowadzona analiza nie uwzględniała dodatkowego czasu związanego z późniejszym posortowaniem skompletowanych towarów.

Tabela 3. Średnie czasy kompletacji zamówień pojedynczych i łączonych w magazynach z 15 alejkami i 40 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent czasu kompletacji zamówienia pojedynczego)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	7:24 (100%)	11:46 (159,01% / 2 = 79,50%)	15:18 (206,83% / 3 = 68,94%)	8:52 (119,81% / 2 = 59,90%)	9:50 (132,88% / 3 = 44,29%)
	5	10:25 (100%)	16:19 (156,68% / 2 = 78,34%)	20:47 (199,48% / 3 = 66,49%)	12:41 (121,69% / 2 = 60,85%)	14:20 (137,61% / 3 = 45,87%)
	7	12:52 (100%)	20:02 (155,59% / 2 = 77,80%)	24:54 (193,48% / 3 = 64,49%)	15:51 (123,09% / 2 = 61,55%)	18:02 (140,14% / 3 = 46,71%)
	9	15:18 (100%)	23:01 (150,47% / 2 = 75,23%)	28:07 (183,77% / 3 = 61,26%)	18:45 (122,52% / 2 = 61,26%)	21:24 (139,85% / 3 = 46,62%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Średnie liczby odwiedzanych alejek podczas jednego cyklu kompletacyjnego w magazynach z 15 alejkami i 40 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent liczby odwiedzanych alejek przy kompletacji zamówień pojedynczych)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	2,81 (100%)	5,08 (181%)	6,95 (247%)	3,02 (107%)	3,05 (109%)
	5	4,39 (100%)	7,47 (170%)	9,66 (220%)	4,88 (111%)	5,10 (116%)
	7	5,75 (100%)	9,31 (162%)	11,48 (200%)	6,41 (112%)	6,71 (117%)
	9	6,94 (100%)	10,69 (154%)	12,69 (183%)	7,72 (111%)	8,04 (116%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Średnie czasy kompletacji zamówień pojedynczych i łączonych w magazynach z 15 alejkami i 60 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent czasu kompletacji zamówienia pojedynczego)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	9:13 (100%)	15:10 (164,36% / 2 = 82,18%)	19:56 (216,08% / 3 = 72,03%)	11:03 (119,77% / 2 = 59,89%)	12:09 (131,78% / 3 = 43,93%)
	5	13:19 (100%)	21:18 (159,94% / 2 = 79,97%)	27:15 (204,53% / 3 = 68,18%)	16:22 (122,83% / 2 = 61,42%)	17:58 (134,86% / 3 = 44,95%)
	7	16:50 (100%)	26:08 (155,24% / 2 = 77,62%)	32:33 (193,37% / 3 = 64,46%)	20:10 (119,86% / 2 = 59,93%)	22:40 (134,69% / 3 = 44,90%)
	9	19:55 (100%)	30:04 (150,98% / 2 = 75,49%)	36:34 (183,63% / 3 = 61,21%)	23:41 (118,97% / 2 = 59,49%)	26:54 (135,09% / 3 = 45,03%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

Źródło: opracowanie własne.

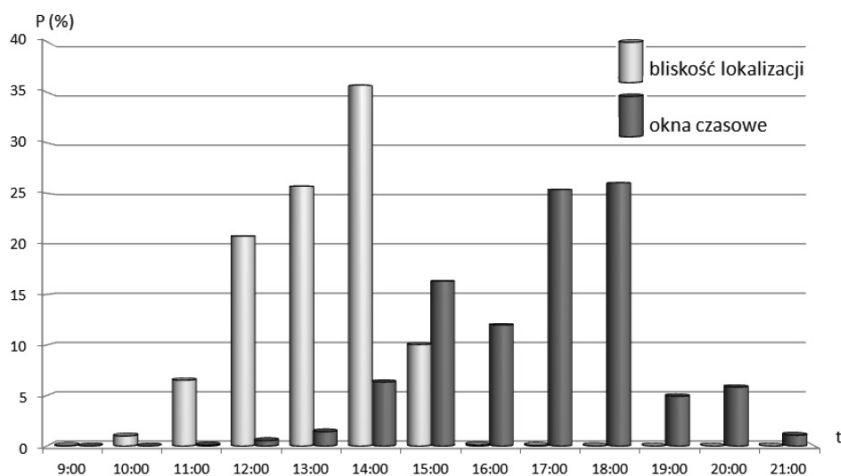
Tabela 6. Średnie liczby odwiedzanych alejek podczas jednego cyklu kompletacyjnego w magazynach z 15 alejkami i 60 półkami na regale (w nawiasach wyrażone jako procent liczby odwiedzanych alejek przy kompletacji zamówień pojedynczych)

		Liczba zamówień kompletowanych łącznie				
		1	2	3	2*	3*
Liczba towarów na zamówieniu	3	2,80 (100%)	5,10 (182%)	6,95 (248%)	3,02 (108%)	3,05 (109%)
	5	4,38 (100%)	7,48 (171%)	9,68 (221%)	4,89 (112%)	5,08 (116%)
	7	5,75 (100%)	9,28 (161%)	11,48 (200%)	6,41 (111%)	6,71 (117%)
	9	6,95 (100%)	10,66 (153%)	12,68 (182%)	7,73 (111%)	8,05 (116%)

* Zamówienia łączone zgodnie z kryterium minimalizacji liczby odwiedzanych alejek.

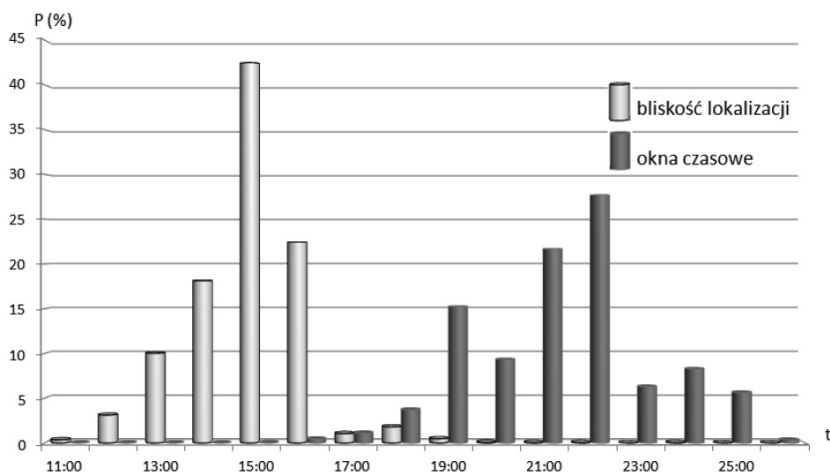
Źródło: opracowanie własne.

Podczas wykorzystania podejścia analitycznego badania zazwyczaj są ograniczone do wyznaczenia wartości średnich czasów kompletacji zamówień. Symulacje umożliwiają przeprowadzenie analizy, która jest bardziej kompletna. Rysunki 1-3 przedstawiają wykresy rozkładu prawdopodobieństwa czasu kompletacji oraz liczby



Rys. 1. Rozkład prawdopodobieństwa czasu kompletacji dla łączonych dwóch zamówień dla kryterium bliskości lokalizacji (jaśniejszy odcień) i okna czasowego (ciemniejszy odcień)

Źródło: opracowanie własne.

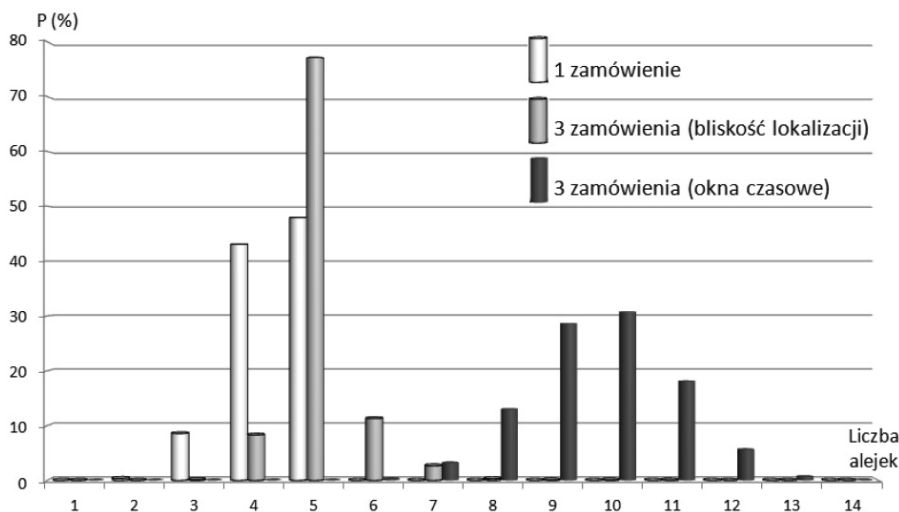


Rys. 2. Rozkład prawdopodobieństwa czasu kompletacji dla łączonych trzech zamówień dla kryterium bliskości lokalizacji (jaśniejszy odcień) i okna czasowego (ciemniejszy odcień)

Źródło: opracowanie własne.

odwiedzanych alejek dla zleceń 5-elementowych pojedynczych i łączonych w magazynach z 15 alejkami i 40 półkami na regale. Rozwiązania oparte na łączeniu zamówień w ramach okna czasowego są zdominowane stochastycznie przez wariant wykorzystujący bliskość lokalizacji towarów w magazynie. Na wykresie na rys. 3

widzimy, że połączenie trzech zamówień w ramach reguły bliskości lokalizacji powoduje nieznaczne zwiększenie liczby odwiedzanych alejek (dla 77% przypadków magazynier wszedł do 5 alejek, a gdy zamówienia kompletowano pojedynczo, prawdopodobieństwo, że będą to 4 alejki lub 5 alejek, wynosi 91%).



Rys. 3. Rozkład prawdopodobieństwa liczby odwiedzanych alejek podczas jednego cyklu kompletacyjnego dla pojedynczego zamówienia i zamówień łączonych

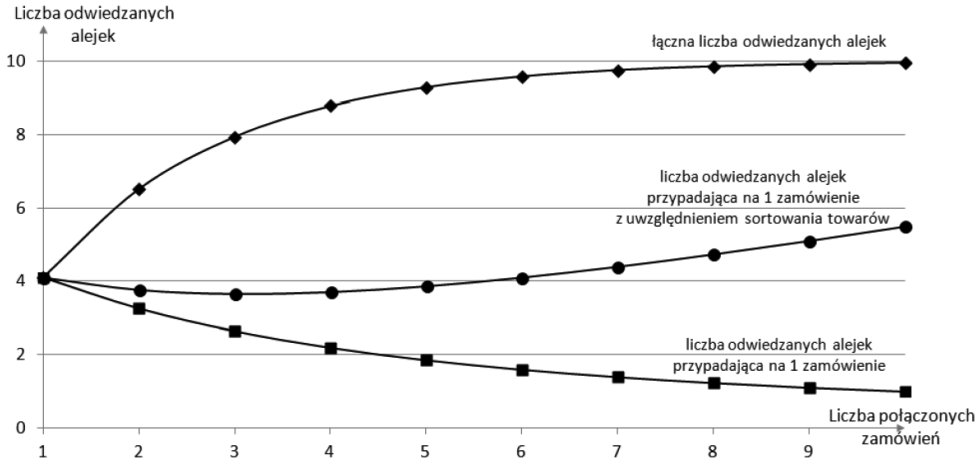
Źródło: opracowanie własne.

Z przeprowadzonych badań wynika, że korzyść z optymalizacji liczby odwiedzanych przez magazyniera alejek jest często nawet większa niż z samego połączenia zamówień.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań analitycznych z uwzględnieniem dodatkowej pracy przeznaczanej na sortowanie towarów.

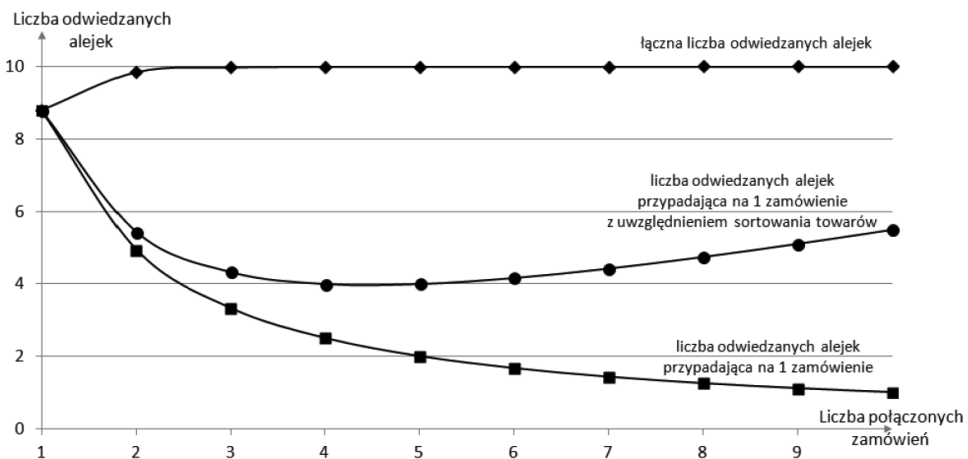
Na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano średnie liczby odwiedzanych alejek: przypadające na całą połączoną listę kompletacyjną oraz w przeliczeniu na pojedyncze zamówienie. Założono, że czas potrzebny na posortowanie każdego dodatkowego zamówienia dołożonego do listy kompletacyjnej jest równy czasowi przejścia przez magazyniera przez połowę długości alejki. Z przeprowadzonych badań wynika, że liczba zamówień, których połączenie spowoduje spadek łącznego czasu kompletacji i sortowania zależy od wielkości tych zamówień. Dla zamówień 5-elementowych optymalna liczba łączonych zamówień wyniosła 3, zaś dla zamówień 20-elementowych – 4 (zbadano również warianty pośrednie, które potwierdzały tę zależność). Jeśli wzrost czasu sortowania związany z dołożeniem jednego zamówienia równy będzie czasowi potrzebnemu na przejście przez magazyniera całej długości alejki (rys. 6 i 7), to łączenie zamówień 5-elementowych wcale nie będzie opłacalne, a dla

zamówień zawierających od 10 do 20 towarów najkorzystniejszy wariant obejmuje połączenie trzech zleceń.



Rys. 4. Średnia liczba odwiedzanych alejek podczas kompletacji zamówień łączonych dla magazynów z 10 alejkami, zamówień 5-elementowych oraz $d = 0,5$

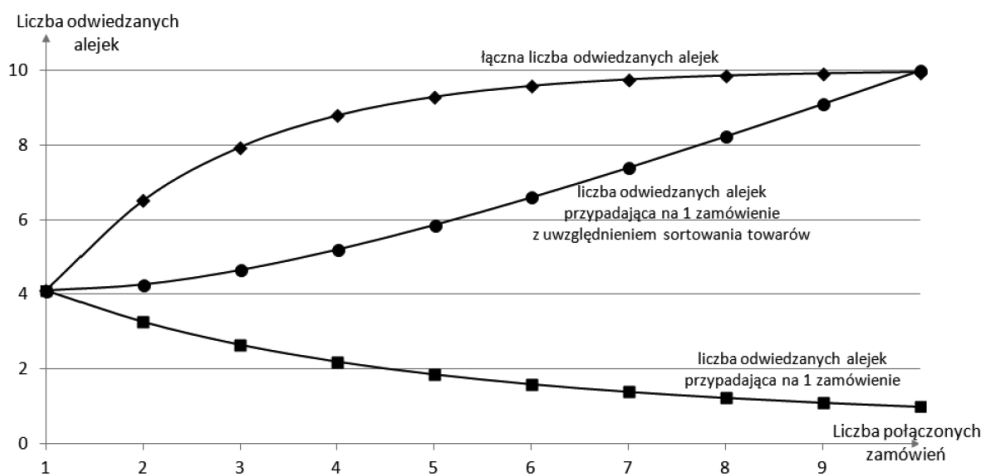
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Średnia liczba odwiedzanych alejek podczas kompletacji zamówień łączonych dla magazynów z 10 alejkami, zamówień 20-elementowych oraz $d = 0,5$

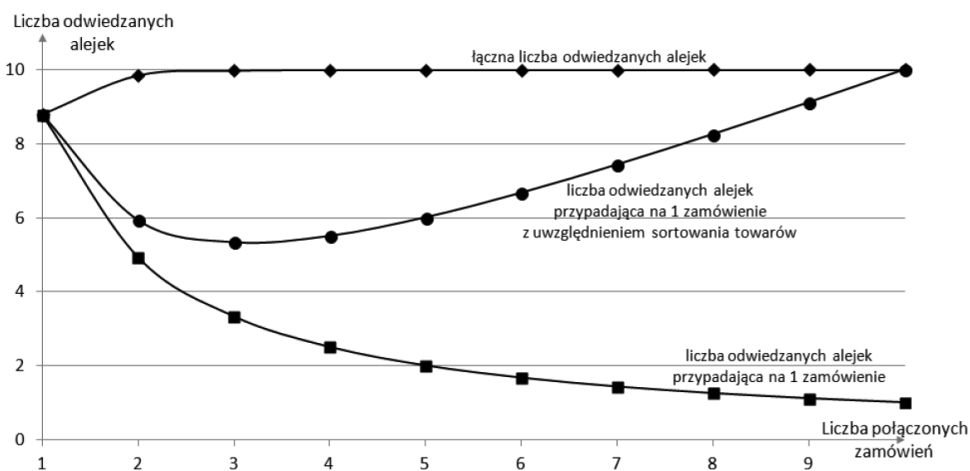
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 8 przedstawiono maksymalne wartości przyrostu czasu przeznaczanego na sortowanie związanego z dołożeniem jednego zamówienia. Dla magazynów



Rys. 6. Średnia liczba odwiedzianych alejek podczas kompletacji zamówień łączonych dla magazynów z 10 alejkami, zamówień 5-elementowych oraz $d = 1$

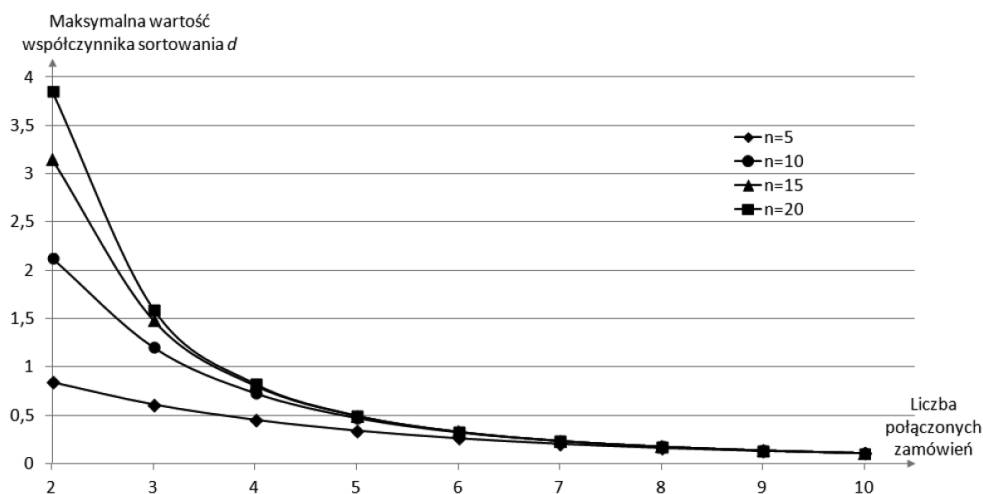
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Średnia liczba odwiedzianych alejek podczas kompletacji zamówień łączonych dla magazynów z 10 alejkami, zamówień 20-elementowych oraz $d = 1$

Źródło: opracowanie własne.

z 10 alejkami dwa zamówienia 20-elementowe opłaca się połączyć, gdy czas sortowania nie przekracza czasu, w którym magazynier przechodzi przez 3,86 długości alejki, ale dla zamówień 5-elementowych jest to już tylko 0,84 długości alejki. Różnica wartości jest dość duża przy łączeniu niewielkiej liczby zamówień. W przy-



Rys. 8. Maksymalna wartość współczynnika sortowania d , przy których opłacalne jest łączenie zamówień dla magazynów z 10 alejkami

Źródło: opracowanie własne.

padku konsolidacji 7 zamówień wartości te są już zbliżone i wynoszą od 0,20 dla zamówień 5-elementowych do 0,24 dla zamówień 20-elementowych.

6. Zakończenie

Jednym ze sposobów na skrócenie średniego czasu kompletacji zamówień jest organizacja pracy w magazynie, która umożliwi realizację kompletacji łączonych zleceń. Wdrożenie takiego rozwiązania niesie ze sobą szereg trudności, które mogą być jednak zrekomensowane znaczną redukcją dystansu pokonywanego przez magazyniera podczas pobierania towarów, a co za tym idzie, również czasu kompletacji przypadającego na jedno zamówienie.

Łączenie zamówień w ramach okna czasowego skutkuje zazwyczaj krótszymi czasami kompletacji, poszukiwanie i scalanie zamówień najbardziej do siebie podobnych nierzadko podwaja te korzyści. Na efektywność kompletacji ma także wpływ proces sortowania towarów. Maksymalny czas sortowania zamówień może być powiązany z czasem przejścia przez magazyniera przez alejkę. Takie podejście powoduje, że uzyskane rozwiązania są bardziej uniwersalne i niezależne od indywidualnych parametrów magazynu. Umożliwia też poszukiwanie optymalnej liczby zamówień, które powinny być połączone. Liczba ta zależy nie tylko od czasu sortowania, ale także od wielkości zamówień. Zwiększanie jej wartości powinno się wiązać z ciągłą poprawą efektywności sortowania towarów.

Literatura

- Chen M.C., Wu H.P., 2005, *An association-based clustering approach to order batching considering customer demand patterns*, Omega, 33(4), s. 333-343.
- De Koster R., Le Duc T., Roodbergen K.J., 2007, *Design and control of warehouse order picking: A literature review*, European Journal of Operational Research, 182(2), s. 481-501.
- Dmytrów K., 2013, *Procedura kompletacji zakładająca oczyszczanie lokalizacji*, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, tom 2, Metody Ilościowe w Ekonomii, nr 31, Szczecin, s. 22-36.
- Dmytrów K., Doszyń M., 2015, *Taksonomiczna procedura wspomagania kompletacji produktów w magazynie*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Taksonomia 25, *Klasyfikacja i analiza danych – teoria i zastosowania*, Wrocław, s. 72-80.
- Gademann A.J.R.N., Van Den Berg J.P., Van Der Hoff H.H., 2001, *An order batching algorithm for wave picking in a parallel-aisle warehouse*, IIE transactions, 33(5), s. 385-398.
- Gademann N., Velde S., 2005, *Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse*, IIE transactions, 37(1), s. 63-75.
- Garbacz M., Łopuszyński M., 2015, *Optymalizacja procesu kompletacji w magazynie, część 1 i 2*, Logistyka, nr 6, s. 628-647.
- Kłodawski M., 2012, *Klasowe metody rozmieszczenia asortymentu i ich wpływ na wydajność procesu kompletacji*, Logistyka, nr 4, s. 379-390.
- Krawczyk S. (red.), 2011, *Logistyka. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Difin, Warszawa.
- Krawczyk S., Jakubiak M., 2011, *Rola komisjonowania w sterowaniu przepływami produktów*, Logistyka, nr 4, s. 475-486.
- Sabo A., 2013, *Analiza problemu kompletacji zamówień w magazynie wysokiego składowania*, Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, s. 103-121.
- Sharp G.P., Choe K., Yoon C.S., 1991, *Small Parts Order Picking: Analysis Framework and Selected Results*, Springer, Berlin Heidelberg, s. 317-341.
- Tarczyński G., 2012, *Analysis of the impact of storage parameters and the size of orders on the choice of the method for routing order picking*, Operations Research and Decisions, no. 4, Wrocław, s. 105-120.
- Tarczyński G., 2013a, *Warehouse Real-Time Simulator – How to Optimize Order Picking Time*, Working Paper, <http://ssrn.com/abstract=2354827>.
- Tarczyński G., 2013b, *Wielokryterialna ocena procesu kompletacji towarów w magazynie*, Studia Ekonomiczne, nr 163, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 221-238.
- Tarczyński G., 2015a, *Estimating order-picking times for return heuristic – equations and simulations*, LogForum, 11(3), s. 293-301.
- Tarczyński G., 2015b, *Średnie czasy kompletacji zamówień dla heurystyki s-shape – wzory i symulacje*, Studia Ekonomiczne, nr 237, Informatyka i Ekonometria, nr 2, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 104-116.