

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU WSADOWEGO DO SZEREGOWANIA ZADAŃ PRODUKCYJNYCH

Andrzej JARDZIOCH, Bartosz SKOBIEJ

Streszczenie: W artykule zaprezentowano algorytm kolejkowania metodą zadań wsadowych oraz przeprowadzono badania symulacyjne pozwalające na ocenę jego efektywności. Przeprowadzono badania oceniające przydatność proponowanego algorytmu w przypadku braku czasu na przeprowadzenie przeszukiwania zupełnego przestrzeni optymalizacyjnej i niemożliwości wykorzystania kosztownego oprogramowania specjalistycznego. Wyniki uzyskane przez zaproponowany algorytm porównano do wyników uzyskanych za pomocą prostych algorytmów sortujących oraz wyników uzyskanych metodą przeszukiwania zupełnego. Dodatkowo rezultaty skonfrontowano z wynikami uzyskanymi przez autorski algorytm genetyczny. Jako kryterium porównawcze przyjęto zysk uzyskany z realizacji zbioru zleceń produkcyjnych.

Słowa kluczowe: szeregowanie zadań, sterowanie produkcją, metoda wsadowa.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zadań podsystemu planowania jest ustalenie kolejności realizacji zleceń produkcyjnych. Najważniejszym zadaniem jest spełnienie oczekiwań klientów poprzez zagwarantowanie dotrzymania terminowości realizacji zleceń produkcyjnych przy jednoczesnej maksymalizacji zysku uzyskiwanego w wyniku sprzedaży przyjętych do realizacji zleceń produkcyjnych [1, 2, 3, 4]. Problematyka szeregowania zadań produkcyjnych jest obszarem niezwykle złożonym i analizowanym w wielu ośrodkach badawczych. Analizowane problemy dotyczą szerokiego spektrum począwszy od zagadnień stricte teoretycznych w których poszukiwane są rozwiązania optymalne aż do prac w których autorzy proponują rozwiązania suboptymalne kładąc większy nacisk na możliwości praktycznego wykorzystania opracowanych metod. Najczęściej proponowane rozwiązania obejmują statyczne reguły priorytetu, algorytmy metaheurystyczne jak na przykład procedura Tabu Search, symulowane wyżarzanie, algorytmy immunologiczne oraz algorytmy genetyczne [3, 5, 6, 7, 8].

Zadania szeregowania zleceń produkcyjnych realizowane są w przedsiębiorstwach przez wyspecjalizowane komórki planistyczne [9, 10]. Powszechnie stosowane systemy klasy ERP oraz współpracujące z nimi systemy MES pozwalają na zarządzanie gospodarką magazynową, zbieranie informacji produkcyjnych, szczegółową kalkulację i monitorowania kosztów produkcji. Mimo olbrzymich możliwości współczesnych komputerowych systemów wspomagających procesy planistyczne nadal nie rozwiązany pozostaje problem szybkiego generowania harmonogramów produkcyjnych. Brak jest efektywnych narzędzi pozwalających na ustalenie kolejności wprowadzonych do procesu produkcyjnego zleceń oraz prawidłowe przypisanie poszczególnych zleceń do maszyn.

W artykule przedstawiono koncepcję szeregowania zleceń produkcyjnych z wykorzystaniem metody wsadowej. Przyjęto, iż najważniejszym kryterium według którego oceniane powinny być poszczególne uszeregowania jest dochód uzyskiwany w wyniku

realizacji wszystkich zleceń. Dochód ten zdefiniowany został jako suma przychodów uzyskanych z wykonania wszystkich zleceń pomniejszonych o ewentualne kary związane z opóźnieniami w ich wykonaniu.

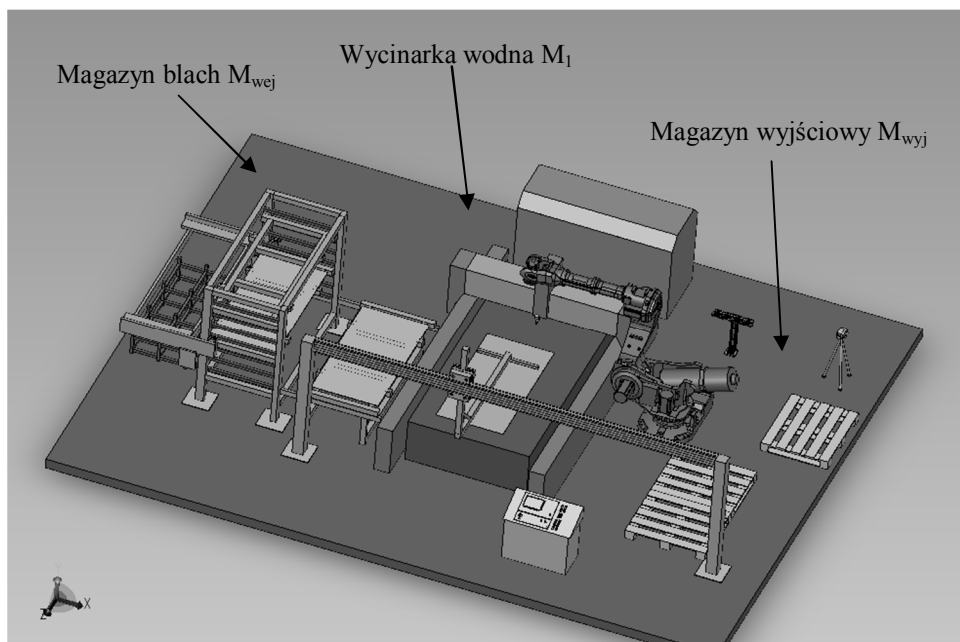
Problematyka szeregowania zadań produkcyjnych jest obszarem niezwykle złożonym i poruszonym w wielu publikacjach naukowych. Ze względu na zakwalifikowanie tego problemu do zagadnień NP-trudnych bardzo często proponowane rozwiązania bazują na algorytmach metaheurystycznych takich jak procedura Tabu Search, logika rozmyta, algorytmy immunologiczne, algorytmy genetyczne, symulowane wyżarzanie oraz inne metody sztucznej inteligencji [3, 5, 7].

W praktyce do planowania produkcji wykorzystywane są często reguły priorytetowe ze względu na ich prostą budowę i małą złożoność obliczeniową [4, 12]. Można tutaj wymienić takie reguły jak:

- Reguła szeregująca zlecenia według terminu przybycia zlecenia do systemu (FIFO – ang. First In First Out.). Reguła ta odzwierciedla intuicyjny proces rozwiązywania konfliktów zasobowych i jest często stosowana do porównywania innych metod szeregowania zadań.
- Reguła szeregująca zlecenia według terminu ich wykonania (EDD – ang. Earliest Due Date). Reguła ta pozwala na uwzględnienie wymaganych terminów wykonania poszczególnych zleceń produkcyjnych. Uszeregowania uzyskane z wykorzystaniem tej reguły charakteryzują się minimalnymi opóźnieniami.
- Reguła szeregująca zlecenia według najkrótszego czasu obróbki (SPT - ang. Shortest Processing Time). Bardzo często stosowana reguła w zadaniach szeregowania zleceń produkcyjnych. Uznawana jest za bardzo efektywną w procesie minimalizowania opóźnień w przypadku systemów produkcyjnych o bardzo dużym obciążeniu.
- Reguła szeregująca zlecenia według sumy czasów operacji pozostałych do wykonania (LWR – ang. Least Work Remaining). Faworyzowanie zleceń z najmniejszą sumą operacji pozostałych do wykonania pozwala szybciej zakończyć te zlecenia i w ten sposób zmniejszyć wielkość zamrożonego kapitału znajdującego się w produkcji.
- Reguła szeregująca zlecenia według liczby koniecznych do realizacji operacji (MOR – ang. Most Operations Remaining, LOR – ang. Least Operations Remaining).
- Reguła szeregująca zlecenia według przypisanych im kar za opóźnienia, od największej (DDP – ang. Decending Delay Penalty).

2. Opis problemu

W artykule przedstawiono problem szeregowania zleceń produkcyjnych w elastycznym systemie produkcyjnym realizującym wycinanie elementów z arkuszy blach (rys. 1). Najważniejszym elementem analizowanego systemu jest wycinarka strumieniowa M_1 oraz zautomatyzowany regałowy magazyn blach M_{wej} . Zlecenia produkcyjne przekazywane są przez klienta drogą internetową do podsystemu planowania i tam w sposób automatyczny szeregowane i sukcesywnie przekazywane do realizacji. Po obróbce gotowe wyroby trafiają do magazynu wyjściowego M_{wyj} a klient informowany jest o możliwości odbioru zamówionego zlecenia.



Rys. 1. Schemat analizowanego systemu produkcyjnego

Analizowany system pracuje w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej. W związku z tym występuje bardzo duża różnorodność zleceń trafiających do produkcji. Zlecenie produkcyjne z_i opisane jest następującymi parametrami:

- zdefiniowany w postaci cyfrowej kształt wycinanego elementu,
- grubość blachy z której zamówiony element ma zostać wycięty,
- liczba sztuk wycinanych elementów,
- wymagany termin realizacji zlecenia d_{zi} ,
- przychód uzyskiwany w wyniku zrealizowania zlecenia r_{zi} ,
- waga kary za opóźnienie w_{zi} pozwalająca na określenie kwoty kary w przypadku nie wykonania zlecenia w terminie,
- czas wymagany na wykonanie zlecenia.

Kara za opóźnienie K_{zi} jest naliczana w przypadku, gdy rzeczywisty termin wykonania zlecenia oznaczany jako C_{zi} jest dłuższy niż planowany termin wykonania zlecenia d_{zi} (czyli gdy $C_{zi} - d_{zi} > 0$). W przypadku, gdy rzeczywisty termin zakończenia zlecenia C_{zi} jest krótszy niż planowany termin wykonania zlecenia d_{zi} opóźnienie nie występuje i kara nie jest naliczana. Kara za opóźnienie K_{zi} jest proporcjonalna do czasu opóźnienia i wskaźnika kary $K_{zi} = \max \{0, C_{zi} - d_{zi}\} * w_{zi}$.

Celem procesu szeregowania zleceń produkcyjnych jest ustalenie takiego harmonogramu ich realizacji, aby uzyskany dochód był maksymalny, czyli aby funkcja opisująca sumę przychodów uzyskanych z wykonania wszystkich zleceń pomniejszonych o ewentualne kary za ich opóźnienia przyjęła wartość maksymalną. Funkcję celu przedstawia wzór (1), adaptowany z pozycji literaturowej [7].

$$D = \sum_{i=1}^N r_{zi} - w_{zi} * \max \{0, C_{zi} - d_{zi}\} \quad (1)$$

gdzie:

D – dochód uzyskany w wyniku realizacji przyjętego uszeregowania zleceń produkcyjnych,

N – liczba przyjętych zleceń produkcyjnych,

r_{zi} – przychód uzyskany w wyniku realizacji i -tego zlecenia,

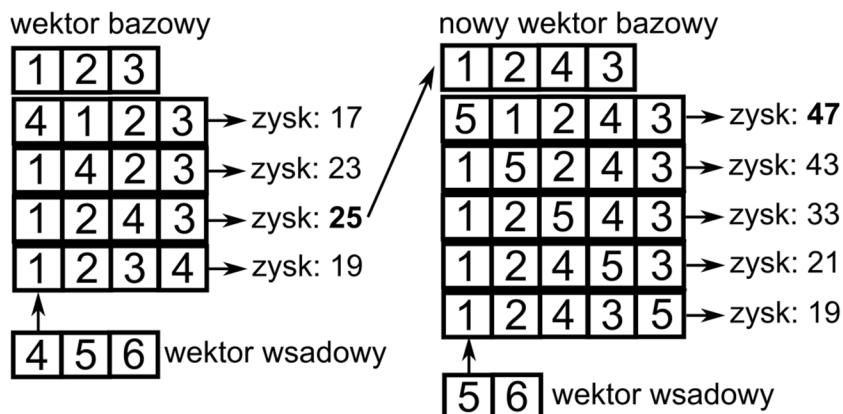
w_{zi} – waga kary i -tego zlecenia,

C_{zi} – rzeczywisty termin wykonania i -tego zadania,

d_{zi} – wymagany termin wykonania i -tego zlecenia.

3. Zasada działania algorytmu wsadowego

W celu przejrzystego i intuicyjnego przedstawienia proponowanego algorytmu, wprowadzono dwie definicje: wektor bazowy zleceń oraz wektor wsadowy zleceń. Pod pojęciem wektora bazowego należy rozumieć uszeregowaną część zleceń, których miejsce w ustalonym szeregu jest niezmiennie. Jest to szereg do którego będziemy sukcesywnie wprowadzać zlecenia z wektora wsadowego w ustalonej kolejności. Wprowadzanie zlecenia odbywa się poprzez badanie skutków jego obecności w kolejnych miejscach ciągu wektora bazowego, od miejsca 0 do miejsca $m+1$, gdzie m jest liczbą zleceń ciągu bazowego. Po przeprowadzeniu badania ze wszystkich przeliczonych kombinacji typowany jest ciąg generujący największy zysk zgodnie z funkcją opisaną wzorem (1). Taki ciąg zostaje uznany za kolejny ciąg bazowy. Idea działania algorytmu została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy działania algorytmu wsadowego.

W prezentowanych badaniach długość wektora bazowego oraz metoda jego sortowania definiowane są przez użytkownika. Sortowanie wektora bazowego jest możliwe z zastosowaniem metod EDD, DDP, SPT i metody losowej. Zapewniona jest również opcja wprowadzenia dowolnego wektora bazowego przez operatora algorytmu. Takie rozwiązanie pozwala na zastosowanie ciągu wektora bazowego otrzymanego przy pomocy innych metod, np. algorytmu genetycznego. Podobnie jak w przypadku wektora bazowego również wektor wsadowy może być szeregowany metodami EDD, DDP, SPT i metodą losową.

Z uwagi na zastosowane pojęcia i dla ułatwienia opisu badań zdecydowano się wprowadzić charakterystyczną symbolikę opisującą konkretne działanie algorytmu wsadowego:

- przykład 1 opisany symbolem $15EDD\oplus 35EDD$ oznacza, że wektor bazowy składa się z 15 zleceń uszeregowanych metodą EDD a wektor wsadowy składa się z ciągu 35 zleceń uszeregowanych metodą EDD, które w kolejności zależnej od wymaganego terminu realizacji będą sukcesywnie wprowadzane do wektora bazowego,
- przykład 2 opisany symbolem $10DDP\oplus 5SPT$ oznacza, że wektor bazowy składa się z 10 zleceń uszeregowanych metodą DDP a wektor wsadowy składa się z ciągu 5 zleceń uszeregowanych metodą SPT, które w kolejności zależnej od czasu wymaganego do przetworzenia zlecenia będą sukcesywnie wprowadzane do wektora bazowego,
- przykład 3 opisany symbolem $1\oplus 49RAND$ oznacza, że wektor bazowy składa się z 1 zlecenia a wektor wsadowy składa się z 49 losowych zleceń. Powyższy przykład ilustruje dynamiczne zastosowanie algorytmu w przypadku braku informacji na temat nadchodzących zleceń.

3.1. Złożoność obliczeniowa algorytmu

W zależności od liczby rozpatrywanych zleceń oraz od metody przyjętej do przeszukiwania przestrzeni potencjalnych rozwiązań złożoność obliczeniowa wyrażona liczbą przeliczeń wzoru (1) może przyjmować szeroki zakres od 1 do $n!$, gdzie n oznacza liczbę zleceń.

W przypadku metody wsadowej złożoność obliczeniowa określona jest wzorem (2),

$$\sum_{i=1}^j (b + i) \quad (2)$$

gdzie:

b – liczba zleceń w wektorze bazowym,

j – liczba zleceń w wektorze wsadowym.

Dla prostych metod sortowania, takich jak EDD, DDP, SPT złożoność obliczeniowa równa jest całkowitej liczbie zleceń. Porównanie złożoności obliczeniowej przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie złożoności obliczeniowej metod

liczba zadań	przeszukiwanie zupełne	algorytm genetyczny*	metoda wsadowa	
			$(n-1)\oplus 1$	$1\oplus (n-1)$
7	5040	5040	8	27
8	40320	16000	9	35
9	362880	18000	10	44
10	3628800	20000	11	54
50	$3,04 \cdot 10^{64}$	100000	51	1274
100	$9,33 \cdot 10^{157}$	200000	101	5049

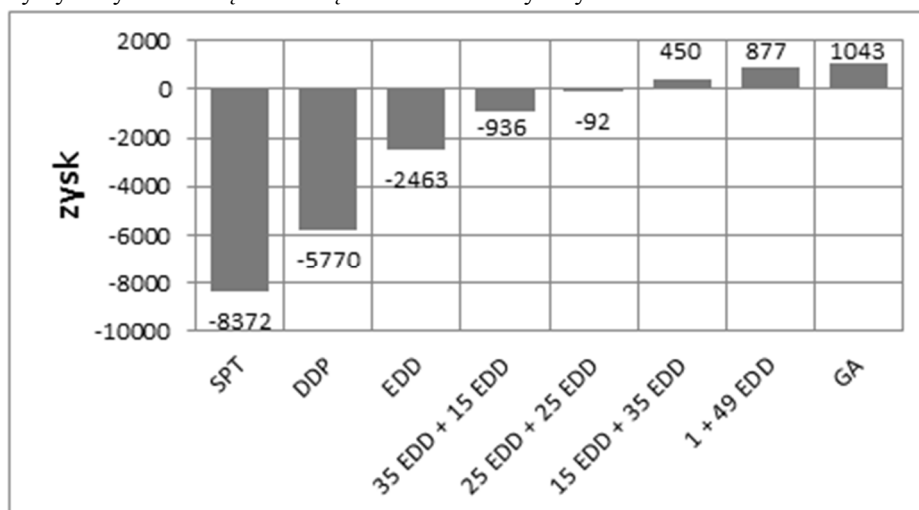
*klasyczny algorytm genetyczny (20 osobników, 100 populacji)

4. Badania i wyniki eksperymentu obliczeniowego

Przed przystąpieniem do badań zdecydowano się na ukierunkowanie działań w celu odpowiedzi na trzy pytania:

1. Czy metoda wsadowa generuje lepsze wyniki niż sortowania klasyczne?
2. Jaka jest jakość wyników otrzymanych metodą wsadową w porównaniu do zastosowanego algorytmu genetycznego?
3. Czy jakość sortowania wektora bazowego ma wpływ na jakość rozwiązań końcowych?

Analizując pytanie pierwsze, można intuicyjnie stwierdzić że odpowiedź na nie brzmi „tak”. Biorąc pod uwagę złożoność obliczeniową proponowanej metody można zaobserwować iż obszar przeszukiwania przestrzeni optymalizacyjnej jest tutaj szerszy niż w metodach EDD, DDP czy SPT. Przeprowadzone badania, których wynik przedstawiono na rys. 3 potwierdzają przyjętą tezę. Należy jednak zaznaczyć że w przypadkach małej liczby zleceń rzędu 3-5, obserwowano akcydentalny brak różnic w wynikach otrzymywanych metodą wsadową a metodami klasycznymi.



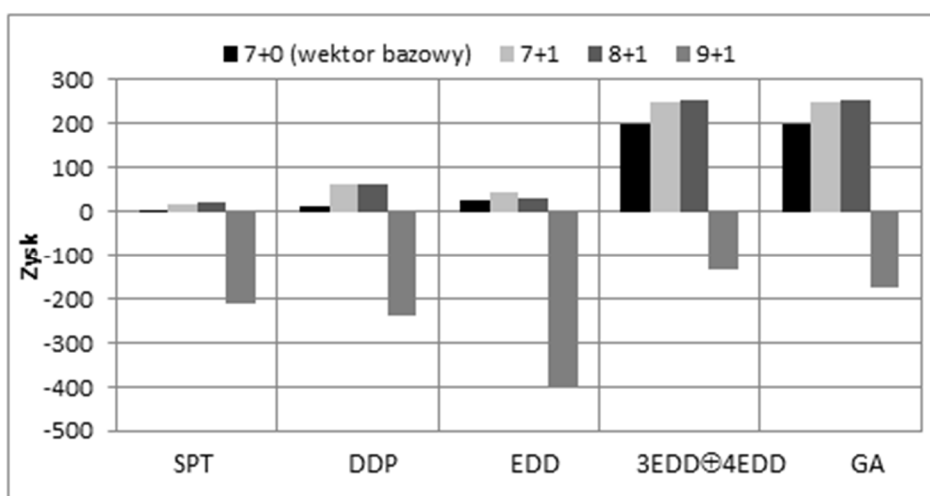
Rys. 3. Porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami szeregowania dla 50 losowych zleceń

Z uwagi na złożoność obliczeniową problemu szeregowania 50 zleceń i brak możliwości przeszukania pełnego rozwiązań, przyjęto że okolica obszaru optymalnego jest wyznaczana przez wyniki algorytmu genetycznego, które w większości badań był najlepszymi uzyskanymi. Przykładowa różnica w uzyskanych wynikach została uwidoczniła na rys. 3. gdzie algorytm genetyczny wygenerował wynik 1043 a najlepsza z metod wsadowych (1⊕49EDD) wygenerowała wynik 877.

Należy zaznaczyć, że w trakcie badań miało miejsce kilka przypadków gdy wyniki uzyskane za pomocą algorytmu genetycznego nie były najlepszymi. Dla liczby zleceń 50 i 100 zdarzało się iż najlepszy wynik uzyskano stosując metody wsadowe (1⊕49EDD, 1⊕99EDD). Za główną przyczynę takich zdarzeń uznano niedostosowanie do zadania parametrów i funkcji wewnętrznych algorytmu genetycznego. Innym możliwym powodem osiągnięcia gorszych rezultatów przez algorytm genetyczny mógł być specyficzny zestaw zleceń pozwalających na efektywne sortowanie metodami klasycznymi.

Niemniej jednak, po przeprowadzeniu 20 prób z listami 50 losowo wygenerowanych zleceń określono, że metoda wsadowa $1\oplus 49\text{EDD}$ generuje wyniki średnio o 23% gorsze od algorytmu genetycznego. Równocześnie stanowi to odpowiedź na pytanie numer 2 postawione we wstępie do punktu 4.

W celu zbadania wpływu jakości wektora bazowego na osiągnięte wyniki wylosowano 10 zleceń testowych. Następnie określono wektor bazowy złożony z 7 zleceń sortowanych metodami SPT, DDP, EDD, $3\text{EDD}\oplus 4\text{EDD}$, GA. Kolejnym krokiem było dodawanie poszczególnych zleceń z wektora wsadowego za każdym razem ustalając wektor bazowy jako ciąg zleceń o najlepszym zysku z poprzedniego badania. Osiągnięte rezultaty przedstawiono na rys. 4. Analizując rys. 4. można zaobserwować ogólną tendencję sugerującą że im lepszy jest wektor bazowy (w sensie przyjętego kryterium), tym lepsze wyniki można uzyskać po dodaniu kolejnego zlecenia do wektora bazowego. Najlepszy rezultat uzyskano ustalając wektor bazowy z wykorzystaniem algorytmu genetycznego. Na szczególną uwagę w przeprowadzonym badaniu zasługuje metoda wsadowa oparta na sortowaniu wektora bazowego metodą $3\text{EDD}\oplus 4\text{EDD}$ dla liczby 10 zleceń ($9\oplus 1$). Okazała się ona skuteczniejsza od algorytmu genetycznego. Co więcej, sortowanie metodą wsadową bazowało na wynikach poprzednich sortowań natomiast algorytm genetyczny musiał zostać uruchomiony z nowym zestawem zleceń i rozpocząć przeszukiwanie całej przestrzeni optymalizacyjnej co w przypadku większej liczby zleceń wiąże się z długim czasem obliczeń.



Rys. 4. Wpływ jakości wektora bazowego na zysk uzyskiwany z uszeregowień

5. Wnioski

Biorąc pod uwagę przeprowadzone badania, metodę wsadową należy uznać za interesujący przykład przeszukiwania heurystycznego. W zależności od długości wektora bazowego i sposobu sortowania wektorów można uzyskać wyniki średnio odbiegające o 23% od wyników uzyskanych przez algorytm genetyczny. Dzieje się tak pomimo przeszukiwania obszaru optymalizacyjnego o kilka rzędów wielkości mniejszego od obszaru badania algorytmem genetycznym. Za największą zaletę prezentowanej metody należy uznać prostotę obliczeniową i wykorzystanie powszechnie stosowanych metod

sortowania. Pozwala to na implementację metody wsadowej nawet w popularnych arkuszach kalkulacyjnych na komputerach o przeciętnych mocach obliczeniowych przez operatorów posiadających podstawowe przeszkolenie z dziedziny inżynierii produkcji.

Literatura

1. Jardzioch A.: Sterowanie elastycznymi systemami obróbkowymi z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2009.
2. Gupta J.N.D., Forgionne G.A., Mora T. (Eds.): Intelligent decision-making support systems. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
3. Jardzioch A., Skobiej B.: Analysis of Variable Changeover Times Impact on the Revenue in Manufacturing Process. Academic Journal of Manufacturing Engineering, vol. 11 (4/2013), s. 114-117, Editura Politehnica 2013.
4. Binchao C., Matis T.I.: A flexible dispatching rule for minimizing tardiness in job shop scheduling. International Journal of Production Economics, Volume 141, Issue 1, January 2013, s.360–365, Elsevier B.V. 2013.
5. Skołod B., Wosik I.: Algorytmy immunologiczne w szeregowaniu zadań produkcyjnych. Zarządzanie Przedsiębiorstwem Nr 1 (2008), s. 47-56, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją 2008.
6. Chmiel W., Kadłuczka P., Packanik G.: Zastosowanie algorytmów rojowych w rozwiązaniu zagadnień permutacyjnych. Automatyka 2011, Tom 15, Zeszyt 2, s. 117-126, Wydawnictwo AGH 2011.
7. Wang X., Xie X., Cheng T.C.E.: A modified artificial bee colony algorithm for order acceptance in two-machine flow shops. International Journal Production Economics 141 (2013) s. 14-23, Elsevier B.V. 2013.
8. Pawlak M.: Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji, Warszawa, PWN 1999.
9. Kasprzycki A., Knosala R.: Metoda reprezentacji wiedzy w systemie eksperckim wspomagającym planowanie produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Zarządzanie Przedsiębiorstwem Nr 1/2005, s. 20-36, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją 2005.
10. Gracel J., Grobler-Dębska K., Dutkiewicz L.: Analiza przepływu informacji między systemami klasy ERP, APS i MES w obszarze zarządzania produkcją, VI Krakowska Konferencja Młodych Uczonych, s. 825-838, Kraków 2011.
11. Zhang R.: An Artificial Bee Colony Algorithm Based on Problem Data Properties for Scheduling Job Shops, Procedia Engineering, nr 23 (2011), s.131 – 136, Elsevier B.V. 2011.
12. Jardzioch A., Bulwan K.: The Prioritisation of Production Orders Under the Bee Colony Algorithm, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 37, No. 4, s.49-59, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2013.

Dr hab. inż. prof. ZUT Andrzej Jardzioch

Mgr inż. Bartosz Skobiej

Instytut Technologii Mechanicznej

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

70-310 Szczecin, Al. Piastów 19, tel./fax: (91) 449 42 66

e-mail: andrzej.jardzioch@zut.edu.pl, bartosz.skobiej@zut.edu.pl