

PRZEGLĄD ALGORYTMÓW SZEREGOWANIA ZADAŃ W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH WYTWARZANIA

Mariusz UCHROŃSKI

Streszczenie: w pracy został zawarty przegląd problematyki szeregowania zadań w elastycznych systemach wytwarzania. Przytoczone zostały najbardziej popularne definicje elastycznych systemów wytwarzania, rodzaje elastyczności. Zostały także przedstawione klasy metod rozwiązujących problem gniazdowy z maszynami równoległymi stanowiący przybliżony model elastycznego systemu wytwarzania.

Słowa kluczowe: elastyczny system wytwarzania, szeregowanie zadań, problem gniazdowy z równoległymi maszynami, algorytm równoległy.

1. Wprowadzenie

Problemy szeregowania zadań w elastycznych systemach wytwarzania FMS (ang. *Flexible Manufacturing Systems*) ciągle cieszą się dużym zainteresowaniem naukowców na całym świecie. W pracy został zawarty krótki przegląd literatury na temat elastycznych systemów wytwarzania. Zagadnienie szeregowania zadań w FMS oraz ich złożoność obliczeniowa została przedstawiona na przykładzie problemu gniazdowego z maszynami równoległymi, który jest pewnym uogólnieniem NP – trudnego problemu gniazdowego. Proponowaną metodologię przedstawiono na przykładzie dwupoziomowego algorytmu poszukiwania z zabranieniami i przetestowano na przykładach testowych z literatury (Hurink [6]).

2. Definicje elastycznych systemów wytwarzania

W literaturze można spotkać wiele definicji pojęcia jakim jest elastyczny system wytwarzania. Wiele z tych definicji jest opartych na urządzeniach wykorzystywanych w rozpatrywanym systemie. Na przykład w pracy [1] zawarta jest następująca definicja elastycznego systemu wytwarzania:

„Elastyczny system wytwarzania stanowi zespół sterowanych numerycznie obrabiarek oraz system zautomatyzowanego transportu i magazynowania pracujących pod kontrolą komputerowego systemu sterowania.”

O’Keefe i Kasirajan [13] w swojej pracy definiują elastyczny system wytwarzania w następujący sposób:

„Elastyczny system wytwarzania to zespół urządzeń wytwórczych połączonych poprzez zautomatyzowany system transportu i magazynowania zdolny do produkcji lub montażu produktów o dużej różnorodności pod kontrolą komputerowego systemu sterowania.”

Inne definicje elastycznych systemów wytwarzania odnoszą się do potencjału czy wydajności systemu wytwarzania. Na przykład, Kaltwasser [5]

„Elastyczny system wytwarzania jest wysoko zautomatyzowanym systemem produkcyjnym zdolnym do produkcji dużej liczby różnorodnych produktów wykorzystując to samo wyposażenie i ten sam system sterowania.”

We wszystkich przytoczonych wyżej definicjach elastycznych systemów wytwarzania powtarzają się takie pojęcia jak: *obrabiarki sterowane numerycznie, zautomatyzowany transport i magazynowanie, komputerowy system sterowania oraz elastyczność*. Komputerowy system sterowania i zautomatyzowane urządzenia wytwórcze stanowią główną cechę, która odróżnia elastyczne systemy wytwarzania od konwencjonalnych systemów wytwórczych.

3. Rodzaje elastycznych systemów wytwarzania

Elastyczne systemy wytwarzania można podzielić na typy w zależności od liczby i rodzaju maszyn, ich przeznaczenia i rozmieszczenia. Podobnie jak w przypadku definicji elastycznych systemów wytwarzania w literaturze spotykane są różne sposoby podziału elastycznych systemów wytwarzania na typy. Na przykład w pracy [12] został zaproponowany podział FMS na cztery typy:

- elastyczny moduł produkcyjny (automatyczna stacja obróbkowa) – stanowi najprostszy typ FMS i składa się z jednej obrabiarki ogólnego przeznaczenia sterowanej numerycznie, jest odpowiednikiem konwencjonalnego systemu jednomaszynowego,
- elastyczne gniazdo produkcyjne – stanowi kilka modułów produkcyjnych, które są wzajemnie zintegrowane poprzez transport, magazynowanie i sterowanie komputerowe, w zależności od sposobu wykorzystania odpowiada ogólnemu systemowi gniazdowemu lub systemowi z maszynami równoległymi,
- elastyczna linia produkcyjna – stanowi zbiór specjalistycznych maszyn rozmieszczonych w ustalonym porządku, przy czym każda operacja może być wykonywana tylko na jednej maszynie, charakteryzuje się zdolnością do częstych i szybkich przebrojeń, odpowiada konwencjonalnemu systemowi przepływowemu,
- elastyczna sieć produkcyjna - stanowi najbardziej złożony rodzaj elastycznego systemu wytwarzania, składa się z kilku wzajemnie powiązanych linii, gniazd lub pojedynczych modułów, może być rozpatrywana jako ogólny system typu gniazdowego z równoległymi maszynami.

Elastyczne systemy wytwarzania mogą charakteryzować się różną strukturą w zależności od rozmieszczenia obrabiarek i zastosowanych środków transportu. W pracy [12] zostały wyróżnione cztery podstawowe struktury elastycznych systemów wytwarzania:

- *liniowa*, w której obrabiarki są rozmieszczone po obu stronach linii transportowej,
- *kołowa*, w której trasa transportowa systemu przenośników stanowi zamknięty obwód owalny lub prostokątny,
- *plaszczynowa (gniazdowa)*, w której urządzenie wytwórcze SA rozmieszczone swobodnie na powierzchni do tego celu przeznaczonej, a ich sposób rozmieszczenia jest zależny od wymogów technologicznych,
- *drabinowa*, w której palety obiegają na przenośniku obrabiarki, a na odcinku buforowym oczekują na zwolnienie obrabiarki.

Przedstawione wyżej struktury elastycznych systemów wytwarzania posiadają swoje wady i zalety. Struktura liniowa i kołowa charakteryzują się zwartą budową, co zapewnia dobre wykorzystanie powierzchni. Struktury te mogą zostać w łatwy sposób rozbudowane poprzez przedłużenie linii transportowej. Do wad struktury liniowej i kołowej można zaliczyć utrudniony dostęp do obrabiarek podczas prac obsługowych i konserwacyjnych oraz podczas

usuwania skutków awarii. Struktura gniazdowa zapewnia swobodny dostęp do stanowisk oraz możliwość łatwej rozbudowy. Jako wady tej struktury można wymienić dużą zajmowaną powierzchnię oraz długie drogi transportowe. w strukturze drabinowej każda obrabiarka jest otoczona przez system transportowy czego bezpośrednim następstwem jest utrudniony dostęp do obrabiarek.

3. Elastyczność i rodzaje elastyczności

W pracy [12] elastyczność jest zdefiniowana jako „*zdolność systemu do jednoczesnej krótkoterminowej (a nawet jednostkowej) produkcji wielu różnych typów, przy wysokiej wydajności całego systemu, porównywalnej z wydajnością automatycznych linii dla produkcji masowej.*” Typowe rodzaje elastyczności zostały przedstawione poniżej [1, 12]:

- elastyczność maszyn,
- elastyczność asortymentu produkcji,
- elastyczność wielkości produkcji,
- elastyczność procesu produkcyjnego,
- elastyczność marszrut technologicznych,
- elastyczność rozwoju systemu,
- elastyczność ograniczeń kolejnościowych.

4. Szeregowanie zadań w elastycznych systemach wytwarzania

Zarządzanie produkcją i szeregowanie zadań w elastycznych systemach wytwarzania jest bardziej skomplikowane niż w tradycyjnych systemach wytwarzania takich jak gniazda czy linie produkcyjne. Potwierdzeniem powyższego stwierdzenia są własności elastycznych systemów wytwarzania, które zostały przedstawione poniżej:

- każda maszyna w FMS jest wszechstronna, co pozwala na wykorzystanie różnorodnych narzędzi i wykonywanie różnych operacji. Cecha ta pozwala na wytwarzanie różnorodnych produktów w dowolnym czasie;
- oprócz szeregowania zadań na maszynach także inne elementy wchodzące w skład zautomatyzowanego systemu transportu takie jak wózki AGV czy palety wymagają opracowania harmonogramów;
- operacje związane z wytwarzaniem konkretnego produktu mogą być wykonywane na kilku alternatywnych maszynach w różnym czasie;
- w FMS produkcja może być kontynuowana w sytuacjach krytycznych jakimi są awarie. w odróżnieniu od tradycyjnych systemów wytwarzania typu gniazdowego, w których w przypadku awarii produkcja jest przerywana, a czasy przebrojenia maszyn są duże w FMS występują obrabiarki sterowane numerycznie, co pozwala na silną redukcję czasów przebrojeń i skierowanie operacji przydzielonych do maszyny która uległa awarii na maszynę alternatywną.

Jako przybliżony model elastycznego systemu wytwarzania można potraktować problem gniazdowy z maszynami równoległymi (*ang. flexible job shop problem*). Problem ten można sformułować w następujący sposób. System produkcyjny składa się z określonej liczby gniazd produkcyjnych. w każdym z gniazd produkcyjnych należy wykonać określoną liczbę zadań produkcyjnych. Zadanie produkcyjne stanowi ciąg operacji, które należy wykonać

w określonej kolejności, zwanej marszrutą technologiczną. Gniazdo produkcyjne stanowi zbiór niekoniecznie identycznych maszyn. Każda operacja posiada określone gniazdo, w którym może ona być wykonywana. Wykonanie operacji wymaga zaangażowania jednej dowolnej maszyny z tego gniazda przez określony czas. Rozwiązanie problemu gniazdowego z maszynami równoległymi polega na przydzieleniu operacji do maszyn, a następnie rozwiązanie klasycznego problemu gniazdowego.

Problem gniazdowy z równoległymi maszynami w przypadku, gdy w każdym gnieździe znajduje się jedna maszyna sprowadza się do klasycznego problemu gniazdowego. Powyższy fakt oraz NP - trudność problemu gniazdowego bezpośrednio determinuje przynależność problemu gniazdowego z równoległymi maszynami do klasy problemów NP – trudnych. Praktyka pokazuje jednak, że problem gniazdowy z równoległymi maszynami jest znacznie trudniejszy w porównaniu do klasycznego problemu gniazdowego. Bezpośrednią konsekwencją wypływającą z powyższych stwierdzeń jest zmniejszenie się rozmiaru problemów jakie można rozwiązać optymalnie przy użyciu algorytmów dokładnych oraz pogorszenie się rozwiązań dostarczanych przez algorytmy przybliżone.

Algorytmy dokładne dla problemu gniazdowego z równoległymi maszynami [13] pozwalają na rozwiązanie w rozsądnym czasie problemów o rozmiarze nie większym niż 20 maszyn i 10 zadań. W literaturze zostało zaproponowanych wiele algorytmów przybliżonych, głównie algorytmów metaheurystycznych. Hurink, Jurisch i Thole [7] zaproponowali algorytm poszukiwania z zabronieniami dla tego problemu. Także Pauli [16] zaproponował w swojej pracy algorytm poszukiwania z zabronieniami rozszerzając reprezentację grafową dla klasycznego problemu gniazdowego o przydział operacji do maszyn. Mastrolilli i Gambardella [13] zaproponowali algorytm poszukiwania z zabronieniami z efektywnym otoczeniem dla problemu gniazdowego z równoległymi maszynami. Wielu autorów w swoich pracach przedstawia dwuetapową metodę rozwiązywania problemu gniazdowego z równoległymi maszynami polegającą na przydzieleniu operacji do maszyn na pierwszym poziomie, a następnie rozwiązaniu klasycznego problemu gniazdowego na drugim poziomie. Podejście takie zostało przedstawione m.in. w pracach Brandimarte [2] oraz Pauli [16].

Także algorytmy genetyczne zostały zaadoptowane do rozwiązywania problemu gniazdowego z równoległymi maszynami [20, 5, 10, 16]. w pracy Gao, Sun i Gen [5] został zaproponowany hybrydowy algorytm genetyczny. Tylko kilka prac porusza możliwość rozwiązania problemu gniazdowego z równoległymi maszynami przy użyciu algorytmu równoległego. Yazdani, Amiri i Zandieh [20] proponują w swojej pracy równoległy algorytm VNS (*ang. Variable Neighborhood Search*) dla problemu gniazdowego z równoległymi maszynami oparty na niezależnych równoległych uruchomieniach algorytmu VNS. Defersha i Chen [20] przedstawiają gruboziarnisty równoległy algorytm genetyczny oparty na modelu wyspowym, w którym zrównoleglenie skupione jest na operatorach genetycznych i skalowalności algorytmu. Dwa wspomniane wyżej algorytmy równoległe nie wykorzystują specyficznych własności rozwiązywanego problemu. W pracy [1] zostały zaproponowane równoległe dwupoziomowe algorytmy metaheurystyczne dla problemu gniazdowego z maszynami równoległymi. Opisane w pracy algorytmy wykorzystują nową metodę generowania otoczenia oraz specyficzne własności rozpatrywanego problemu. Eksperymenty obliczeniowe zostały przeprowadzone na klastrze obliczeniowym Nova we Wrocławskim Centrum Sieciowo – Superkomputerowym.

5. Równoległy dwupoziomowy algorytm poszukiwania z zabronieniami

W problemie gniazdowym z maszynami równoległymi liczba możliwych przydziałów operacji do maszyn jest wykładnicza. Dla każdego dopuszczalnego przydziału generowany jest NP – trudny problem gniazdowy (*ang. job shop*), którego rozwiązanie polega na wyznaczeniu optymalnej kolejności wykonywania operacji na maszynach. W związku z powyższym stwierdzeniem optymalne rozwiązanie problemu gniazdowego z maszynami równoległymi wymaga rozwiązania wykładniczej liczby NP – trudnych problemów gniazdowych. Bardzo długi czas działania algorytmów dokładnych jest bezpośrednim powodem zastosowania do rozwiązania problemu gniazdowego z maszynami równoległymi algorytmu przybliżonego. Działanie proponowanego algorytmu sprowadza się do iteracyjnego wykonywania następujących kroków:

Krok 1: Wyznaczenie dopuszczalnego przydziału operacji do maszyn.

Krok 2: Rozwiązanie problemu gniazdowego dla przydziału wyznaczonego w Kroku 1.

W kroku 1 został zastosowany algorytm poszukiwania z zabronieniami, w którym otoczenie dla aktualnego przydziału wyznaczone jest przez przeniesienia pojedynczych operacji z maszyny na maszynę. Dla każdego elementu z otoczenia uruchamiany jest algorytm TSAB [14] rozwiązujący klasyczny problem gniazdowy. Metoda zrównoleglenia zastosowana w proponowanym algorytmie oparta jest na podziale otoczenia przydziału operacji do maszyn, generowanego w każdej iteracji algorytmu, na grupy. Dla każdej grupy k rozwiązywane są klasyczne problemy gniazdowe przy użyciu p procesorów. Liczba grup uzależniona jest od rozmiaru sąsiedztwa. Do wygenerowania startowego przydziału operacji do maszyn została wykorzystana metoda poszukiwania minimum w tablicy czasów wykonywania operacji na poszczególnych maszynach opisana w pracy [17]. Szczegółowy opis proponowanego równoległego dwupoziomowego algorytmu poszukiwania z zabronieniami można znaleźć w pracy [1].

Tab. 1. Wartości rozwiązań dla przykładów testowych Hurink'a [6].

problem	nxm	MG[13]	hGA[5]	TS
mt10x	10x11	918	918	927
mt10xy	10x12	906	905	923
mt10xyz	10x13	847	849	867
mt10c1	10x11	928	927	927
mt10cc	10x12	910	910	919
setb4x	15x11	925	925	929
setb4xyz	15x13	905	905	916
setb4c9	15x11	919	914	928
setb4cc	15x12	909	914	909
seti5x	15x16	1201	1204	1218
seti5xyz	15x18	1125	1126	1144
seti5c12	15x16	1174	1175	1185

6. Eksperymenty obliczeniowe

Równoległy dwupoziomowy algorytm poszukiwania z zabronieniami rozwiązujący problem gniazdowy z maszynami równoległymi został zaimplementowany w języku C++ i uruchomiony na klastrze obliczeniowym Nowa we Wrocławskim Centrum Sieciowo – Superkomputerowym. Eksperymenty zostały przeprowadzone dla 12 instancji testowych zaproponowanych przez Hurink’a [6]. Wyniki obliczeń zostały zamieszczone w Tabeli 1.

Wyniki uzyskane przez zaproponowany w pracy algorytm są zbliżone najlepszych znanych wyników [5]. Równoległa implementacja algorytmu pozwoliła na kilkukrotne skrócenie czasu działania algorytmu.

7. Wnioski

Szeregowanie zadań w elastycznych systemach wytwarzania jest problemem trudnym do rozwiązania na co dowodem jest omówiony wcześniej problem gniazdowy z maszynami równoległymi, który stanowi przybliżony model elastycznego systemu wytwarzania.

Zastosowanie równoległych algorytmów metaheurystycznych jako narzędzia do rozwiązywania problemów szeregowania zadań w elastycznych systemach wytwarzania pozwala na przyspieszenie obliczeń co daje możliwość uzyskania w rozsądnym czasie rozwiązań dla problemów o dużych rozmiarach w elastycznych systemach wytwarzania. Inna metoda pozwalająca na przyspieszenie obliczeń to wykorzystanie specyficznych własności rozwiązywanego problemu (np. własności blokowe) co pozwala na eliminację w procesie poszukiwania rozwiązań, które nie poprawiają wartości funkcji celu. Połączenie dwóch wspomnianych wyżej technik stanowi obiecujący kierunek badań zwłaszcza w przypadku rozwiązywania problemów szeregowania zadań w elastycznych systemach wytwarzania.

Literatura

1. Bożejko W., Uchroński M., Wodecki M.: Parallel hybrid metaheuristics for the flexible job shop problem. *Computers and Industrial Engineering*, 59, 2010, 323-333.
2. Brandimarte P.: Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search. *Annals of Operations Research*, 41, 1993, 157–183.
3. Browne J., Dubois D., Rathmill K., Sethi S. P., Stecke K.E.: Classification of flexible manufacturing systems. *The RMS Magazine*, 4, 1984, 114-117.
4. Byrket D. L., Ozden M. H., Patton J. M.: Integrating flexible manufacturing systems with traditional manufacturing, planning and control, *Journal of Production and Inventory Management*, 29, 1988, 14-21.
5. Gao J., Sun L., Gen M.: A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 35, 2008, 2892–2907.
6. Hurink E., Jurisch B., Thole M.: Tabu search for the job shop scheduling problem with Multi-purpose machine, *Oper. Res. Spektrum* 15, 1994, 205-215.
7. Ho, N. B., Tay, J. C.: GENACE: An efficient cultural algorithm for solving the flexible job-shop problem. In *IEEE international conference on robotics and automation*, 2004, 1759–1766.
8. Hurink E., Jurisch B., Thole M.: Tabu search for the job shop scheduling problem with multi-purpose machine. *Operations Research Spektrum*, 15, 1994, 205–215.

9. Jia H., Nee A., Fuh J., Zhang Y.: A modified genetic algorithm for distributed scheduling problems. *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 2003, 351–362.
10. Kacem I., Hammadi S., Borne P.: Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 32(1), 2002, 1–13.
11. Kaltwasser J., Hercht A., Lang R.: Hierarchical control of flexible manufacturing systems. *IFAC Information Control Problems In Manufacturing Technology*, 30, 8, 1986, 37-44.
12. Krzyżanowski J.: Wprowadzenie do elastycznych systemów wytwórczych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.
13. Mastrolilli M., Gambardella L. M.: Effective neighborhood functions for the flexible job shop problem. *Journal of Scheduling*, 3(1), 2000, 3–20.
14. Nowicki E, Smutnicki C.: A fast tabu search algorithm for the Job shop problem. *Management Science*, 421, 1996, 797–813.
15. O’Keefe R. M., Kasirajan T.: Interaction between dispatching and next station selection rules in a dedicated flexible manufacturing system. *International Journal Of Production Research*, 30(8), 1992, 1753-1772.
16. Pauli J.: A hierarchical approach for the FMS scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 86(1), 1995, 32–42.
17. Pezzella F., Morganti G., Ciaschetti G.: A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35, 2008, 3202–3212.
18. Pinedo M.: *Scheduling: Theory, algorithms and systems*. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall 2002.
19. Sawik T.: *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych*, WNT, Warszawa, 1992.
20. Yazdani M., Amiri M., Zandieh M.: Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 37(1), 2010, 678–687.

Mgr inż. Mariusz UCHROŃSKI
 Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki
 Politechnika Wrocławska
 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
 Tel.: (71) 320 27 45
 Fax.: (71)321 26 77
 e-mail: mariusz.uchronski@pwr.wroc.pl