

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Bożka pt.: „**Zastosowanie sieci Petriego, technik agentowych oraz metod inteligencji obliczeniowej w planowaniu i sterowaniu produkcją**”.

1. Obszar problemowy rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy metod wykorzystywanych do rozwiązywania wybranej klasy rozszerzeń problemów gniazdowych z maszynami równoległymi. Problemy tego typu powszechnie występują w praktyce obejmując szerokie spektrum zadań od harmonogramowania przepływu produkcji, poprzez szeregowanie zadań obliczeniowych w systemach komputerowych, na zarządzaniu rozdziałem zasobów w instytucjach użyteczności publicznej skończywszy. Analiza znanych z literatury przedmiotu metod badań operacyjnych, sztucznej inteligencji i symulacji komputerowej potwierdza tylko, znany z zasady „*No free lunch theorem*”, fakt stwierdzający iż żadne z proponowanych rozwiązań nie okazuje się w pełni skuteczne we wszystkich możliwych zastosowaniach.

W przedstawionym kontekście, uwzględniając specyfikę produkcji wybranego przedsiębiorstwa branży elementów złącznych, opiniowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach planowania i sterowania przepływem realizowanej w nim produkcji, a w szczególności na wykorzystywanych w nich metodach podejmowaniu decyzji. Przedstawione w niej podejście można zrekonstruować w następujący sposób: Dana jest specyfikacja pewnej rozszerzonej wersji problemu gniazdowego z maszynami równoległymi. Rozważane rozszerzenie dopuszcza podział operacji na partie produkcyjne o zmiennym rozmiarze, indywidualne kalendarze dostępności maszyn, czasy przebrojeń zależne od kolejności operacji oraz czasy transportu zależne od kolejności maszyn. Wśród arbitralnie zadanych metod przeszukiwania przestrzeni rozwiązań (wykorzystujących techniki obliczeń inteligentnych) oraz metod symulacji komputerowej (implementujących modele sieci Petriego i systemów agentowych) poszukiwane są rozwiązania najlepiej spełniające

oczekiwania w zakresie planowania produkcji oraz sterowania dyspozytorskiego jej przepływem.

Reasumując, opiniowana rozprawa koncentrując się na zagadnieniach modelowania, planowania i sterowania w systemach jednoczesnej, wieloasortymentowej produkcji dyskretnej podejmuje ważny i aktualny problem wspomagania zarządzania przepływem obsługiwanych zleceń produkcyjnych. Elementy nowości zaproponowanego podejścia przejawiają się tak w oryginalnym sformułowaniu problemu gniazdowego z maszynami równoległymi i podziałem na partie produkcyjne z przepakowaniem, jak i autorskich, proponowanych do jego rozwiązania, metodach implementujących formalizmy teorii sieci Petriego, techniki agentowe oraz inteligencji obliczeniowej. Uważam, że podjęcie przedstawionej problematyki w opiniowanej, noszącej metodologiczno-eksperymentalny charakter, rozprawie jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wielu praktycznych zastosowań związanych m.in. z wykorzystaniem ich komputerowej implementacji jako swoistej „nakładki programowej” w systemach klasy ERP.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana praca liczy 215 stron i składa się z 5 rozdziałów oraz spisów: treści, rysunków i tablic, wykazu ważniejszych skrótów, a także czterech dodatków. Oprócz zawierającego sześć pozycji wykazu netografii załączony jest liczący 136 pozycje, wykaz cytowanej literatury. W spisie tym występuje 6 współautorskich i 5 autorskich publikacji Doktora.

Warto podkreślić, że dwie współautorskie prace opublikowane zostały odpowiednio w: **Przeglądzie Elektrotechnicznym** (2010) (wówczas jeszcze występującym na tzw. liście filadelfijskiej (IF= 0.242)), oraz w **International Journal of Production research** (IF= 1.323).

Załączona lista źródeł bibliograficznych obejmuje ważniejsze pozycje literaturowe z zakresu przedmiotu pracy, warto jednakże odnotować brak co najmniej kilku ważnych, pozycji z zakresu rozprawy, m.in.: Smutnicki Cz., *Algorytmy szeregowania zadań*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012; Bożejko W., Pempera J. (red.) *Optymalizacja dyskretna w informatyce, automatyce i robotyce*. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2012; Nowicki E., *Metoda tabu w problemach szeregowania zadań produkcyjnych*. Oficyna Wydawnicza PW, Wrocław 1999; Wróblewski K.J., Krawczyński R., Kosieradzka A., Kasprzyk S., *Reguły priorytetu w sterowaniu przepływem produkcji*, Warszawa, WNT 1984.

Z merytorycznego punktu widzenia, w rozprawie wyodrębnić można dwie zasadnicze części. W części pierwszej, posiadającej wprowadzająco-systematyzujący charakter (obejmującej rozdziały 1-2) przedstawiono problem badawczy, analizę dostępnej literatury z zakresu przedmiotu rozprawy, sformułowano również cel i tezę pracy. Nawiązując do potrzeby budowy systemów wspomagających planowanie i sterowanie w wybranych środowiskach produkcyjnych, sformułowano autorski model problemu harmonogramowania stanowiący pewne uogólnienie problemu gniazdowego z maszynami równoległymi. Istotnym elementem tego rozszerzenia jest wprowadzenie możliwości przepakowywania przydzielonych partii produkcyjnych. Wprowadzone założenie umożliwiające wybór sposobu rozdziału elementów na partie produkcyjne oraz kolejowania partii do przydzielonych im maszyn pozwoliło wyróżnić trzy warianty modelu: warianty w których wszystkie partie danej operacji muszą być przetwarzane w ustalonej kolejności, bądź też mogą być wymieszane z partiami innych operacji, albo też mogą być przetwarzane w dowolnej kolejności na dowolnych maszynach równoległych. Wyróżnienie ww. wariantów pozwala prześledzić efektywność badanych metod szeregowania zadań w kontekście narastającego rozmiaru przestrzeni przeszukiwań oraz związanej z tym możliwości uzyskania lepszych rozwiązań. Zaproponowany model w sposób jawny zakłada, że przetwarzanie partii produkcyjnych jest niewywłaszczalne, zakłada również w sposób niejawny, że potokowe przetwarzanie partii odbywa się wzdłuż marszrut produkcyjnych bez nawrotów. Oznacza to, że w rozważanym modelu rozważane są przepływy produkcji nie dopuszczające do powstawania zastoju (zakleszczeń).

Implicitnie przyjęte założenie o braku jakichkolwiek ograniczeń narzucanych na topologię tras jezdnych, tudzież marszrut transportowych wykorzystywanego systemu transportu międzystanowiskowego, ogranicza klasę rozważanych sposobów organizacji przepływów partii do przypadków eliminujących powstawanie zastoju.

W części drugiej (rozdziały 3-5), zawierającej główne, poznawcze wyniki rozprawy, przedstawiono badania umożliwiające opracowanie autorskich algorytmów wybranych metod szeregowania zadań, ich programową implementację oraz próbę jakościowej i ilościowej weryfikacji zaproponowanych rozwiązań. W części tej szczególną uwagę zwraca przyjęta metodologia badań. Dla arbitralnie wybranych metod poszukiwania rozwiązań (***Tabu Search i Constraint Programming***) oraz symulacji komputerowej (***sieci Petriego, systemy agentowe***) skojarzonych odpowiednio z planowaniem przepływu produkcji i jej dyspozytorskim sterowaniem opracowano oryginalne procedury implementujące wymienione wcześniej, trzy warianty przetwarzania partii produkcyjnych. Wyniki wielokrotnie

przeprowadzanych, wielodniowych (obejmujących setki godzin) eksperymentów komputerowych potwierdziły praktyczną przydatność proponowanych rozwiązań. Rzetelność i dociekliwość Doktoranta w prowadzeniu badań potwierdzają również liczne odniesienia do benchmarkingów opracowanych dla problemu gniazdowego z maszynami równoległymi - będącego szczególnym przypadkiem rozważanego problemu gniazdowego z maszynami równoległymi i podziałem na partie produkcyjne z przepakowywaniem. Interesujący wątek w tym kontekście stanowi propozycja problemu gniazdowego z maszynami równoległymi i ciągłym przepływem materiału, w którym operacje przetwarzane partiami (interpretowane jako procesy ciągłego przepływu materiału) modelowane są jako funkcje odcinkowo liniowe. Przyjęcie tego modelu pozwala wykorzystać sprawdzone metody optymalizacji kombinatorycznej w problemach reprezentujących procesy ciągłe. Problem ten, stanowiąc uogólnienie problemu gniazdowego z maszynami równoległymi, pozwala na szybsze oszacowanie wyników szeregowania zadań, będące wynikiem lepszej efektywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań.

Pewnym niedostatkiem tej części rozprawy jest bardzo oszczędnie przedstawiony wątek badań związanych z modelowaniem deklaratywnym i związanym z nim programowaniem w logice ograniczeń. Wiążący się w tym kontekście niedosyt dotyczy braku formalnego sformułowania tzw. problemu spełnienia ograniczeń oraz dyskusji dostępnych strategii przeszukiwania.

Kolejna uwaga dotyczy braku sumarycznego, stabelaryzowanego zestawienia przeprowadzonych eksperymentów i dokonanych porównań. Częstkowe, lokalnie dokumentowane wnioski bądź to wyprzedzają wyniki przyszłych badań (stwierdzenie że algorytm *Tabu Search* daje lepsze rezultaty od tych uzyskanych metodą programowania w logice ograniczeń s.99-100 wyprzedza wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla tej drugiej metody), bądź też „rozmywają” się w szeregu innych, kolejno formułowanych uwag autorskich. Interesującą w tym kontekście byłaby również próba propozycji swego rodzaju repozytorium metod i technik dedykowanych do wybranych klas procesów produkcyjnych.

3. Oryginalne osiągnięcia

Zmierzając do osiągnięcia zamierzonych przez siebie celów, Doktorant uzyskał szereg nowych rezultatów. Do ważniejszych z nich, wyróżniających go spośród dostępnych w literaturze przedmiotu, można zaliczyć:

1. Opracowanie autorskiej wersji uogólnionego problemu gniazdowego z maszynami równoległymi uwzględniającej specyfikę organizacji i przepływu produkcji w wybranej fabryce elementów łącznych.
2. Opracowanie komputerowych implementacji uogólnionego problemu gniazdowego w modelach formalnych metody wykorzystującej metaheurystykę *Tabu Search* i metody *programowania w logice ograniczeń*.
3. Opracowanie komputerowych implementacji uogólnionego problemu gniazdowego w modelach formalnych *hierarchicznych czasowych kolorowanych sieci Petriego* oraz *systemu wieloagentowego*.
4. Zaplanowanie oraz przeprowadzenie szeregu eksperymentów i analiz porównawczych, weryfikujących tak wzajemną, jak i odnoszącą się do wybranych benchmarkingów problemu gniazdowego, efektywność opracowanych metod i algorytmów.

Reasumując uważam, że uzyskane rezultaty potwierdzają wysokie kwalifikacje Doktoranta umożliwiające Mu swobodne poruszanie się zarówno w obszarach zagadnień z zakresu modelowania dyskretnych systemów produkcyjnych, metod optymalizacji kombinatorycznej, metod sztucznej inteligencji, a także technik programowania i obsługi współczesnych pakietów oprogramowania użytkowego. Potwierdzają również, że Doktorant potrafi podejmować i samodzielnie realizować zaplanowane cele badawcze.

4. Uwagi

Lektura rozprawy skłania do kilku uwag, tak ogólniejszej, jak i bardziej szczegółowej natury.

Uwagi ogólne:

1. W proponowanym modelu zakłada się występowanie kolizji w dostępie do wspólnych zasobów, zakłada się również brak występowania blokad (zakleszczeń) tak dostępnej floty wózków samojezdnych jak i strumieni potokowo obrabianych partii produkcyjnych. Rodzące się w tym kontekście pytanie dotyczy możliwości wykorzystania przyjętych w rozprawie reprezentacji formalnych, np. w systemach wieloagentowych?
2. Na tle bardzo licznych czaso- i pracochłonnych, rzetelnie przeprowadzonych eksperymentów i analiz odczuwalny jest brak jakiejkolwiek próby całościowego zebrania i uporządkowania uzyskanych wyników. Wydaje się, że mogłoby to znaleźć swój wyraz w opracowaniu stosownej metodyki doboru i weryfikacji metod i technik wykorzystywanych w planowaniu i sterowaniu produkcją. Wydaje się też, że utworzenie stosownego repozytorium tego typu metod i/lub narzędzi może się okazać pomocne w próbach od-

powiedzi m.in. na pytania typu: Jaka strategia doboru i przydziału priorytetów, przy jakiej specyfice zleceń gwarantuje ich optymalną obsługę?

3. Interesującą, w kontekście wyżej wymienionej uwagi, byłaby również ocena możliwości implementacji opracowanej metodyki w systemie doradczym, a także ocena oczekiwanych kompetencji adresowanych do potencjalnego użytkownika takiego systemu.

Uwagi szczegółowe

1. Lekturę pracy utrudnia brak listy stosowanych symboli i oznaczeń. Ma to szczególne znaczenie w tego typu pracach, tzn. pracach odwołujących się do różnych modeli, metod i technik.
2. Widoczny, w tym kontekście, brak stosownej korekty redakcyjnej przejawia się w nielicznych przypadkach:
 - kolizji oznaczeń, np. tym samym symbolem C oznaczany jest wariant rozwiązania s.36 oraz czas dostępności procesorów s.37; zbiór liczb naturalnych w różnych wyrażeniach jest oznaczany w różny sposób, patrz (2.21) i (2.22a); symbol π na s.38 oznacza reprezentację kombinatoryczną zbiorów, a na s.87 sąsiedztwo rozwiązania: z kolei złożoność obliczeniowa raz jest oznaczana symbolem $\theta(\cdot)$, np. „...dla ustalonego k funkcja $r(n)$ jest rzędu $\theta(n^k)$ złożoność obliczeniowa...” s.48, a raz $O(\cdot)$, np. „...rząd wynosi $O(|O|)$...” s. 51;
 - błędnych notacji, np. $[t_1, t_2] \subset C_p$ (jeżeli C_p jest sumą mnogościową zbiorów czyli rodziną zbiorów to wówczas $\{ \dots \{a, [t_1, t_2], \dots \}, \{ \dots \} \dots \}$ $[t_1, t_2] \notin C_p$ oraz $[t_1, t_2] \not\subset C_p$, jeżeli natomiast C_p jest zbiorem to $[t_1, t_2] \in C_p$ a nie $[t_1, t_2] \subset C_p$), podobna sytuacja występuje jeszcze w przypadku formuł: $B_s = (O^s_F, O^s_1, O^s_2, \dots, O^s_f, \dots, O^{s_{bs(s)-2}}, O^s_L) \subseteq V_{CP}(\pi)$, $BI_s = (O^s_1, O^s_2, \dots, O^s_f, \dots, O^{s_{bs(s)-2}}) \subset B^s$,
 - sposobach prezentacji rysunków, np. Rys. 4.11 zawiera dwujęzyczne opisy; z kolei Rys. 3.5 i Rys. 3.6 wymagają legend,
 - usterkach typograficznych, np. s.107 „...1. Technik ta dotyczy...” czy s.119 „...sterownia [7, 68, 131]...”, s.60 „...w podrozdziale (...). ...”, s.107 „...wprowadzona w punkcie (...).”, s.128 „...zamieszczone w dodatku ...)”; braku konsekwencji w zapisach formuł, np. w warunkach (2.10) jest brak, podczas gdy w warunkach (2.12b)-(2.12e) stosowane są nawiasy $[]$, lub też ich nazewnictwie, np. s. 42 warunki (2.18) – (2.20) raz są *relacjami* innym razem zaś *wyrażeniami*,
 - niezręcznościach, skrótach myślowych i/lub błędach stylistycznych, np. s.41 „...surowe czasy ...”; s.107 „...pełniejsza alternatywa...” s.127 „...parametry dyna-

miczne..."; tokeny na s.54 są „usuwane”, na s.55 „wyjmowane”, a na s.71 „wymienia-
ne”; s.55 „...wiązany potem do zmiennej...”.

5. Konkluzja

Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Andrzeja Bożka rozwią-
zany został oryginalny problem badawczy, polegający na implementacji autorskiego modelu
problemu gniazdowego z maszynami równoległymi i podziałem na partie produkcyjne z
przepakowaniem w wybranych metodach szeregowania zadań w systemach jednoczesnej,
wieloasortymentowej produkcji dyskretniej. Doktorant wykazał się znajomością podstawowej
literatury przedmiotu rozprawy, umiejętnością modelowania problemów harmonogramowa-
nia dyskretnych procesów produkcyjnych w systemach gniazdowych, znajomością technik
implementowanych w środowiskach programowania w logice ograniczeń, hierarchicznych
kolorowanych czasowych sieci Petriego oraz systemów wieloagentowych, a także zdolno-
ściami praktycznego wykorzystania tych narzędzi w doskonaleniu przepływów produkcji.

Uważam, że opiniowana praca spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę o
stopniach i tytule naukowym w określeniu do rozpraw doktorskich (Dz. U. Nr. 65 z dnia 14
marca 2003, ze zm. w Dz. U. z 2005 r. Nr 164, oraz w Dz. U. z 2011 r. Nr 84) w dyscyplinie
„informatyka” i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

