

Prof. dr hab. inż. Ewa Dudek-Dyduch
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej
Wydz. E.A.I. i IB, AGH,
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

Kraków, 4. 07. 2015

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

Prezentowana recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej **mgr inż. Andrzeja Bożka**, zatytułowanej "Zastosowanie sieci Petriego, technik agentowych oraz metod inteligencji obliczeniowej w planowaniu i sterowaniu produkcją". Promotorem rozprawy jest. dr hab. inż. Marian Wysocki prof. PRz, zaś promotorem pomocniczym jest dr inż. Tomasz Żabiński.

TEMATYKA I CEL PRACY

Praca związana jest z harmonogramowaniem procesów produkcyjnych, a dokładniej bardzo skomplikowanej klasy procesów produkcyjnych.

Celem pracy, jak pisze Autor, jest: „przygotowanie rozwiązań informatycznych (wybór metod i narzędzi) oraz przetestowanie algorytmów przeznaczonych do planowania i sterowania produkcją dla wybranego środowiska produkcyjnego, które ma postać systemu gniazdowego z maszynami równoległymi, rozszerzonymi dodatkowo o: 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”.

Badania dotyczące problemów decyzyjnych, takich jak szeregowanie, mimo, że prowadzone od ponad 30 lat nie straciły na aktualności, ale wręcz są ciągle obszarem niezwykle intensywnie rozwijanym.

Można mówić o kilku kierunkach rozwoju, ale zwrócę tu uwagę na istotne trzy. Pierwszy polega na rozwiązywaniu coraz bardziej skomplikowanych problemów szeregowania oraz opracowywaniu algorytmów szeregowania realizowanych w czasie rzeczywistym. Przyczyną jest coraz większy obszar zastosowań algorytmów i metod szeregowania. O ile pierwotnym obszarem zastosowań było sterowanie produkcją na poziomie operacyjnym, to wkrótce okazało się, że metody te i algorytmy znajdują zastosowanie również w informatyce, teleinformatyce, zarządzaniu projektami i problemach kolektywnej inteligencji.

Równocześnie, olbrzymi rozwój technologii informacyjnych spowodował rozwój i dużo większą dostępność interaktywnych systemów informatycznych zarządzania produkcją. Dało to możliwość nie tylko praktycznego wykorzystania dedykowanych algorytmów harmonogramowania na poziomie planowania produkcji, ale, co więcej, stworzyło możliwość reagowania w czasie rzeczywistym na zmiany zachodzące w środowisku produkcyjnym. W ślad za tym rozpoczęto nowoczesne badania dotyczące możliwości realizacji harmonogramowania w czasie rzeczywistym (on-line), pomimo faktu, że zdecydowana większość problemów harmonogramowania należy do klasy NP trudnych.

Drugi kierunek związany jest z szeregowaniem zadań przy niepełnej lub niepewnej informacji. Powstają prace dotyczące szeregowania w obecności zakłóceń różnego rodzaju, począwszy od awarii maszyn, konieczności uwzględnienia nieprzewidzianych braków produkcyjnych czy nieprzewidzianego braku surowców. Niepewność dotyczy również czasów operacji czy dostępności maszyn.

Trzeci, nie mniej istotny kierunek badań polega na wykorzystaniu osiągnięć sztucznej inteligencji. Mam tu na myśli metody i modele sztucznej inteligencji, takie jak wykorzystywanie modeli łączących opis zarówno algebraiczny jak i logiczny, programowanie CLP czy też inne, nowe heurystyczne podejścia i algorytmy harmonogramowania zawierające elementy sztucznej inteligencji (między innymi metody uczenia).

Praca doktorska mgr inż. Andrzeja Bożka, która, łączy w sobie dwa z wymienionych kierunków, **wpisuje się zatem w obszar bardzo aktualnych i bardzo ważnych badań.**

Na koniec tego akapitu chciałam zwrócić uwagę, na jeszcze jedną zmianę, jaka zachodzi w rozpatrywanym obszarze. Otóż przeważająca ilość wyników badań publikowana jest pod nazwą „szeregowania zadań” czy „harmonogramowania produkcji”. Tymczasem w miarę rozwiązywania coraz to trudniejszych problemów, obejmujących nie tylko kolejność i przydział operacji do maszyn (procesorów) ale też transport albo szerzej logistykę, remonty i przeglądy i wreszcie zakłócania rozmaitego rodzaju występujące w procesie produkcyjnym, należałoby mówić o **sterowaniu dyskretnym procesem produkcyjnym**, jako świadomym działaniu mającym na celu przeprowadzenie procesu z pewnego stanu początkowego do zbioru wyróżnionych stanów końcowych, zarówno w obecności zakłóceń, jak też przy ich braku. Mamy tu pełną analogię do pojęcia sterowania w klasycznym jego rozumieniu, mimo istotnie różnych klas modeli problemów.

Dlatego też uważam, że tytuł, jaki ma praca doktorska mgr inż. Andrzeja Bożka jest bardzo trafny.

ZAWARTOŚĆ PRACY

Praca składa się z 5 rozdziałów, 4 dodatków, spisu rysunków i tablic oraz bibliografii. Zasadnicze osiągnięcia Autora przedstawione są w rozdziałach 2-4.

W rozdziale **pierwszym**, stanowiącym wstęp do pracy, zdefiniowano problem rozważany w pracy jako rozszerzony problem szeregowania zadań systemu gniazdowego z maszynami równoległymi flexible job shop (LSR-FJS)), podano tezę i cel pracy oraz jej zakres. Rozdział ten zawiera również podstawowe informacje dotyczące trybów harmonogramowania produkcji, sposobów modelowania i najczęstszych metod rozwiązywania problemów tej klasy.

Rozdział **drugi** poświęcono modelowaniu rozpatrywanej klasy procesów produkcyjnych. Podano formalne ograniczenia oraz kryterium definiujące rozważaną klasę problemów, przedstawiono kombinatoryczną i grafową postać reprezentacji rozwiązania, opracowano model wykorzystujący hierarchiczną, czasową, kolorowaną sieć Petriego (HTCPN) oraz zaproponowany przez Doktoranta sposób modelowania pewnej podklasy rozważanego problemu (tzw. wariantu A) – nazwany modelem przepływu materiału (material flow model – MFM).

Rozdział **trzeci** prezentuje wyniki badań Autora dotyczące algorytmów harmonogramowania off-line. Do rozwiązania klasy problemów LSR-FJS zaproponowano metaheurystykę Tabu Search (TS). Dla poszczególnych wariantów (podklas) A, B i C opracowano odpowiednie elementy algorytmu dopasowane do ich specyfiki.

Ostatni punkt tego rozdziału dotyczy wykorzystania programowania w logice z ograniczeniami, w szczególności narzędzia IBM ILOG CP Optimizer.

Rozdział **czwarty** poświęcony jest harmonogramowaniu dynamicznemu klasy problemów LSR-FJS i składa się z dwóch części. Pierwsza dotyczy harmonogramowania w pełni reakcyjnego. Przedstawiono model symulacyjny oparty o formalizm sieci Petriego, dokładnie sieci HTCPN, w którym uwzględniono możliwość dynamicznego wprowadzania decyzji sterujących. Przedstawiono zaproponowane reguły priorytetowe (trzy grupy reguł) do sterowania dynamicznego oraz sposób ich implementacji. Korzystając ze stworzonego narzędzia informatycznego przebadano algorytmy sterowania bez opóźnień i wykorzystujące reguły priorytetowe. Badania przeprowadzono dla trzech wymienionych wariantów (podproblemów) A, B, C. Zamieszczono wyniki eksperymentów wraz z ich analizą. Drugą część rozdziału czwartego poświęcono harmonogramowaniu predykcyjno-reakcyjnemu z wykorzystaniem technik agentowych. Zaproponowano ideę oraz omówiono realizację prototypu predykcyjno-reakcyjnego agentowego systemu harmonogramowania. Przedstawiono eksperymenty z wykorzystaniem tego systemu i analizę ich wyników.

W rozdziale **piątym** zawarto podsumowanie przedstawionych w pracy osiągnięć naukowych oraz kierunki dalszych badań.

Kolejne dodatki zawierają informacje dotyczące używanej w pracy notacji (np. zasady prezentacji formuł i modeli, informacje dotyczące notacji związanej z modelami HTCPN) oraz informacje dotyczące danych i wyników eksperymentów (np. informacje dotyczące instancji testowej dla problemu LSR-FJS, wyniki symulacji działania prototypowego systemu agentowego). Te ostatnie informacje, związane bezpośrednio z rezultatami badań

prezentowanych w pracy, powinny być, moim zdaniem, zamieszczone w głównym tekście odpowiednich rozdziałów pracy.

NAJISTOTNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA AUTORA PRZEDSTAWIONE W PRACY

Realizując postawiony w pracy cel, autor przeprowadził szereg analiz, i eksperymentów, istotnie wzbogacających wiedzę w obszarze problemów LSR-FJS.

Do najistotniejszych osiągnięć autora zaliczam:

- opracowanie matematycznych modeli dla problemu LSR-FJS (z rozróżnieniem jego trzech wariantów) oraz modelu ciągłego przepływu materiału (MFM)
- dla harmonogramowania off-line:
 - zaproponowanie i opracowanie algorytmów opartych na metaheurystyce przeszukiwania z zakazami (Tabu Search) wykorzystujących postać permutacyjno-grafową rozwiązania; porównanie proponowanego rozwiązania z podejściem opartym o model MFM
 - zaproponowanie i wykorzystanie programowania w logice z ograniczeniami,
- dla harmonogramowania dynamicznego całkowicie reakcyjnego:
 - zaproponowanie metody reguł priorytetowych wraz z ich podaniem,
 - zaproponowanie modelowania opartego o formalizm sieci Petriego (dokładniej sieci typu HTCPN) i wykorzystującego narzędzie CPN Tools, zweryfikowanie tego podejścia z wykorzystaniem stworzonego modelu symulacyjnego
- dla harmonogramowania dynamicznego predykcyjno- reakcyjnego: zaproponowanie i zrealizowanie podejścia agentowego
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych zaproponowanych algorytmów oraz opracowanie wynikających z nich wniosków, w szczególności dotyczących rekomendacji zastosowań odpowiednich algorytmów
- stworzenie prototypu aplikacji dla rozwiązywania rozważanych problemów szeregowania

Są to osiągnięcia znaczące, na nich więc opieram generalnie bardzo pozytywną ocenę pracy.

Na uwagę zasługuje również fakt, że autor sformułował dalsze, ciekawe problemy badawcze związane z tematyką pracy, które w przyszłości zamierza rozwiązać. Świadczą one o jego dogłębnej znajomości tematu i gruntownych przemyśleniach.

UWAGI POLEMICZNE

Zwyczajowo recenzja powinna zawierać uwagi dyskusyjne (krytyczne). Z przyjemnością stwierdzam, że analizując pracę pod względem merytorycznym nie stwierdziłam żadnych istotnych uchybień. Niemniej, każda praca, zwłaszcza jak jest ciekawa, rodzi szereg pytań i uwag.

1. Co jest przyczyną, że przyjmuje się różne wielkości partii dla różnych operacji? Należy się domyślić, że takie założenia organizacyjne w produkcji mają na celu lepszy (równomierniejszy) przepływ przetwarzanego materiału. W każdym razie, a zwłaszcza, jeśli słusznie się domyślam, podanie genezy takiego założenia i ewentualna analiza jego wpływu na zależności czasowe wydaje się bardzo ciekawa i przydatna z punktu widzenia algorytmów optymalizacji.

2. Dlaczego czas przyjęto jako podzbiór liczb naturalnych, a nie rzeczywistych dodatnich (czy nieujemnych)? Czy takie przyjęcie jest istotne dla toku rozumowania przedstawionego w pracy?

3. Niedosyt informacji pozostawia natomiast podpunkt 3.4.1 punktu 3.4 poświęconego zastosowaniu technik CLP w optymalizacji klasy rozważanych problemów. Otóż aby wykorzystać narzędzia oparte na podejściu CLP należy stworzyć matematyczny model danego problemu (instancji) zgodny z wymogami tego podejścia (a więc podać zbiór szukanych zmiennych, ich dziedzin oraz relacji pomiędzy zmiennymi), a następnie zaimplementować ten model w odpowiednim języku deklaratywnym. Stworzenie takiego modelu niekoniecznie jest łatwe i nierzadko sam model jest przedmiotem publikacji w czasopismach naukowych. Tymczasem doktorant pomija to, co najważniejsze i najciekawsze w prezentowanym podejściu, pisząc ogólnie, że stworzono 3 modele problemu LSR-FJS (dla trzech wariantów A,B,C) opisując je w języku OPL. Byłoby dobrze, gdyby Doktorant rozwinął ten punkt, wskazując przede wszystkim na różnice pomiędzy tu zastosowanym modelem matematycznym, a modelem przedstawionym w rozdziale 2.

4. Jakkolwiek w pracy doktorant wymienia, wśród różnych typów modeli, modele algebraiczno-logiczne (co mnie cieszy), jednakże cytuje tylko jedną pracę i to nie najbardziej reprezentatywną.

Model algebraiczno-logiczny odpowiedni dla bardzo szerokiej klasy dyskretnych procesów produkcyjnych zaproponowałam na początku lat dziewięćdziesiątych i od tego czasu została rozwinięta zarówno oparta o niego teoria, technologia modelowania jak i dwie nowe metody heurystyczne (Learning Based Method oraz Substitution Task Method), przydatne do rozwiązywania problemów optymalizacji dyskretniej. Obie, wydaje się, mogłyby być zastosowane do klasy problemów rozważanych przez Doktoranta. Model ten szczególnie dobrze nadaje się do implementacji w systemach informatycznych klasy MES, których

zadaniem jest zarówno wypracowanie jak najlepszego prowadzenia dyskretnych procesów produkcyjnych (sterowania off-line i on-line), jak i ich monitorowanie.

Pozwolę sobie zasugerować i byłoby mi miło, gdyby Doktorant zapoznał się z moimi ostatnimi artykułami (dostępnymi w sieci):

“Modeling Manufacturing Processes with Disturbances – a New Method Based on Algebraic-Logical Meta-Model”

“Algebraic Logical Meta-Model of Decision Processes- New Metaheuristics”

“ALMM Solver: the idea and Architecture” (współautorstwo)

Artykuły opublikowane w Artificial Intelligence and Soft Computing, ICAISC, LNAI 9120, LNAI 9119, Springer 2015

Nadmieniam jednakże, że nie oczekuje od Doktoranta na obronie dyskusji dotyczącej ewentualnego wykorzystania meta-modelu algebraiczno-logicznego do zagadnień prezentowanych w jego pracy.

5. Natomiast, za istotny mankament natury edycyjnej pracy uważam brak wykazu oznaczeń, który, przy tak dużej ilości wprowadzonych oznaczeń (i to wprowadzanych w ciągłym w tekście), powinien się znaleźć na końcu lub początku pracy. Ponadto, brak jest komentarzy przy wzorach (np. 2.8 a – 1, 2.12 a-e, 2.15 a-k i wielu innych). Po każdym z tych wyrażeń powinien znaleźć się krótki, jednozdaniowy komentarz wyjaśniający – znakomicie ułatwiłoby to analizę pracy, zwłaszcza, że ilość wskaźników dolnych przy zmiennych wynosi niejednokrotnie 5, a i te wskaźniki dolne posiadają swoje wskaźniki dolne.

6. Uwagi szczegółowe:

Str 38, linia 11 – zamiast „reprezentacja kombinatoryczna problemu” powinno być „reprezentacja kombinatoryczna **rozwiązania** problemu”, jest to istotne o tyle, że w tym wierszu podawana jest definicja tego pojęcia.

Str 37 – sugerowałabym podtytuł” Modele grafowe **rozwiązania**” czy Modele grafowe dla rozwiązań.

PODSUMOWANIE I KOŃCOWA OCENA

Moja ocena recenzowanej rozprawy jest wysoka. Uzasadnieniem tej oceny jest fakt, że Doktorant zmierzył się z bardzo trudną klasą problemów, a zaproponowane przez Niego rozwiązania i uzyskane w pracy wyniki mają duże znaczenie. Ponadto swoje badania przeprowadził dla wszystkich trzech podstawowych trybów harmonogramowania . Doktorant wykazał inwencję naukową, a także umiejętność abstrakcyjnego myślenia i dobrą znajomość stanu wiedzy z rozważanego w pracy obszaru. Zaproponował i wykonał też szereg eksperymentów dla zbadania proponowanych algorytmów

W pracy niewątpliwie postawiono i rozwiązano ważne zagadnienie. Dokonano tego z wykorzystaniem poprawnej metodyki. Zamieszczone uwagi polemiczne w niczym nie kwestionują ani nie umniejszają osiągnięć Doktoranta. Stwierdzam zatem, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie o Stopniach Naukowych i o Tytule Naukowym i **wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej autora do publicznej obrony.**

Prof. Dariusz Dyduch