

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Idzikowskiego pt.: „**Algorytmy optymalizacyjne dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi**”.

1. Obszar problemowy rozprawy

Obserwowana, coraz powszechniejsza wśród małych i średnich firm produkcyjnych strategia dywersyfikacji produkcji prowadzi do poszerzania portfela oferowanych wyrobów celem dostosowania się do wymagań klientów. Związane z tym wymagania wieloasortymentowej, zróżnicowanej i nieregularnej produkcji, charakteryzującej się wieloma małymi zamówieniami, wymuszają niepotokowe formy organizacji przepływu materiałów. Opiniowana rozprawa koncentruje się na jednym z modeli organizacji takich przepływów, w którym przyjmuje się, że realizowane zlecenia (zadania) wykonywane są w tej samej kolejności na wszystkich maszynach wspólnej marszruty technologicznej. Harmonogramowanie zadań w tak rozumianym systemie przepływowym sprowadza się do wyznaczania dopuszczalnych momentów rozpoczęcia i zakończenia wykonywania wszystkich zadań na poszczególnych stanowiskach. Poszukiwany jest harmonogram minimalizujący czas zakończenia realizacji wszystkich zadań.

Z uwagi na NP-trudny charakter omawianego problemu wykorzystywane podejścia koncentrują się na metodach zwracających rozwiązania przybliżone. Heurystyki implementowane w tych metodach uwzględniają specyfikę ograniczeń rozważanych instancji. W prezentowanej rozprawie do ograniczeń tych należą relacje łączące różne zadania realizowane na tej samej maszynie. Relacje determinujące przestoje pomiędzy kolejnymi operacjami (tzw. sprzężenia czasowe), a zatem wpływające na czas realizacji zleceń, opisują sytuacje związane z czasami przezbrojeń (zależnych od kolejności zadań, jakości dostępnych narzędzi itp.), okresowych przeglądów i/lub napraw (zależnych od stopnia zużycia stanowisk, kwalifikacji pracowników itp.), a także dostępności obrabianych przedmiotów (zależnych od obecności lub nie magazynu składowania międzyoperacyjnego, wykorzystywanego środka transportu itp.). Przedstawione ograniczenia wpisując się w zakres metod utrzymania ruchu

WPLYNĘŁO
05-08-2021

(mających na celu obniżenie kosztów produkcji poprzez zapewnienie ciągłości procesów produkcyjnych) umożliwiają wypracowanie bardziej realistycznych (uwzględniających serwisowanie stanowisk pracy) harmonogramów produkcji.

W przedstawionym kontekście, opiniowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach wyznaczania harmonogramów różnych wariantów permutacyjnych i niepermutacyjnych problemów przepływowych bez czekania lub bez przestojów. Ograniczenia bez czekania i bez przestojów charakteryzują organizacje przepływu produkcji, w których odpowiednio: wszystkie operacje każdego zadania są wykonywane bezpośrednio po sobie lub każda maszyna bez przestoju wykonuje operacje kolejnych zadań. Rozważany problem badawczy zakłada opracowanie procedur optymalizacyjnych dedykowanych dla wybranych wariantów ww. ograniczeń. Implementowane w tych algorytmach struktury warunków i reguł decyzyjnych umożliwiają opracowanie metodyki zorientowanej na rozwiązywanie problemów ze sprzężeniami czasowymi w sytuacjach spotykanych w praktyce.

Reasumując, opiniowana rozprawa koncentrując się na zagadnieniach modelowania, planowania i sterowania przepływem produkcji w systemach wieloasortymentowej produkcji dyskretnej podejmuje ważny i aktualny problem wspomagania zarządzania (planowania i sterowania) kolejnością obsługi wykonywanych zleceń. Uważam, że jej teoretyczno-badawczy charakter w pełni uzasadnia zakres podejmowanej w niej problematyki, uzasadniają to zarówno względy poznawcze, jak i możliwości licznych praktycznych zastosowań, tak w branży budowlanej i deweloperskiej, jak i transportowej.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Rozprawa, licząca 181 stron, została podzielona na trzy części obejmujące łącznie 7 rozdziałów oraz uzupełniona o polsko i anglojęzyczne streszczenia pracy, wykaz 146 cytowanych pozycji literaturowych, listy używanych symboli i skrótów, spisy tablic, rysunków i algorytmów, a także indeks ważniejszych haseł. W załączonym wykazie cytowanej bibliografii Doktorant występuje łącznie w 10 pracach (w tym 9 współautorskich), z których 7 opublikowanych zostało w materiałach krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych, jedna (rozdział) w monografii wydawnictwa Springer, a dwie w czasopismach indeksowanych w bazie JCR: *Archives of Control Sciences*, **IF= 1.545** i *Applied Sciences*, **IF=2.474**. Omawiana lista źródeł bibliograficznych obejmuje istotne pozycje literaturowe z zakresu przedmiotu pracy, warto jednakże odnotować brak co najmniej kilku ważniejszych, m.in.:

Billaut, J.C., Della Croce, F., Salassa, F. et al. No-idle, no-wait: when shop scheduling meets dominoes, Eulerian paths and Hamiltonian paths. *J Sched* 22, 2019, 59–68, <https://doi.org/10.1007/s10951-018-0562-4>,

Zdzisław Hejducki, Magdalena Rogalska, *Harmonogramowanie procesów budowlanych metodami sprzężeń czasowych, Monografie, Politechnika Lubelska, Lublin 2017,*

M. Makuchowski, *Nietypowe własności permutacyjnego problemu przepływowego z ograniczeniem bez przestojów, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, tom I, 2015, 604-611.*

Oprócz pierwszego rozdziału „**Wprowadzenie**” i ostatniego „**Wnioski końcowe**” pozostałe 5 rozdziałów zostało zebrane w trzech częściach.

Cześć pierwsza posiadająca wprowadzająco-systematyzujący charakter przybliży wybrane zagadnienia teorii szeregowania zadań. Obejmując rozdziały 2 i 3, w pierwszym z nich przedstawia modele matematyczne i grafowe przepływowych problemów szeregowania skupiając się na wybranych problemach ze sprzężeniami czasowymi (uwzględniających relacje występujące pomiędzy kolejnymi operacjami realizowanymi na tej samej maszynie). W rozdziale 3 omawia struktury wybranych algorytmów optymalizacyjnych stosowanych dla problemów szeregowania zadań. Odwołując się do obszernego przeglądu literatury przedmiotu przedstawia schematy wybranych algorytmów dokładnych (podziału i ograniczeń, programowania dynamicznego oraz programowania liniowego całkowitoliczbowego (**MILP**)) oraz przybliżonych (konstrukcyjnych, lokalnego poszukiwania oraz populacyjnych).

Monograficzna, bardzo lapidarna formuła prezentacji tej części rozprawy stanowi jej główną zaletę. Stwarzając wrażenie swoistych wypisów, nadaje tej części pewien syntetyczny, faktograficzny charakter skutkujący jednak niedostatkami szerszych autorskich uwag i komentarzy. Potencjalnymi obszarami tego typu uwag mogłyby być tutaj np. wnioski płynące z przykładowych, obserwowanych w praktyce, prób wykorzystania omawianych w podanej klasyfikacji metod szeregowania.

Warto też przy okazji zwrócić uwagę na przyjęty, konsekwentnie realizowany schemat redakcyjny zachowany również w rozdziałach pozostałych dwóch części pracy. Każdy z rozdziałów (za wyjątkiem rozdziału 2-ego i 3-ego rozpoczynającego się od podrozdziałów wyróżniających rodzaje odpowiednio: problemów i metod szeregowania) rozpoczyna podrozdział „**Definicja problemu**” i kończy podrozdział „**Wnioski i uwagi**”.

Cześć druga, składająca się z rozdziału 4-ego i 5-ego, zawiera główne poznawcze wyniki rozprawy obejmujące sformułowania autorskich definicji przepływowych problemów szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi oraz wybrane własności tych problemów.

Wyniki eksperymentów komputerowych przeprowadzonych na implementujących te własności nowych wersjach dedykowanych algorytmów optymalizacyjnych potwierdzają konkurencyjność proponowanych rozwiązań.

Przedstawione badania poświęcone są wybranym permutacyjnym i niepermutacyjnym problemom przepływowym ze sprzężeniami czasowymi oraz permutacyjnym problemom przepływowym z ciągłą pracą maszyn i przebrojeniami zależnymi od kolejności wykonywania zadań. Badania te realizowane są według schematu: sformułowanie stosownych (odpowiadających wyodrębnionym problemom) modeli matematycznych i grafowych, identyfikacja wybranych (np. eliminacyjnych) własności, implementacja wyznaczanych własności w algorytmach metod dokładnych i przybliżonych (np. Podziału i Ograniczeń, MILP, Przeszukiwania Snopowego, Przeszukiwania z Zabronieniami oraz Metod Populacyjnych obejmujących algorytmy genetyczne i algorytmy rojowe), przeprowadzenie porównawczych eksperymentów komputerowych.

Mocną stroną tej części pracy stanowi dbałość Doktoranta o szczegóły opisu prowadzonych badań, widoczna m.in. w przedstawianiu szeregu lematów (2), twierdzeniach (6), wnioskach/faktach (3), listingach autorskich procedur obliczeniowych oraz tabelarycznych zestawieniach wyników przeprowadzonych eksperymentów komputerowych.

Spośród niedostatków, głównie redakcyjnych, tej części rozprawy warto wskazać na brak odniesień do sytuacji występujących w praktyce, pozwalających ocenić rodzaj i skalę potencjalnych zastosowań uzyskanych wyników, np. w kontekście obecności lub nie magazynów składowania międzyoperacyjnego, potokowej lub nie potokowej organizacji przebiegu produkcji. Podobny niedosyt budzi brak autorskiej definicji klasy ograniczeń odnoszących się do „sprzężeń czasowych” (obejmujących znane z literatury ograniczenia typu no-wait i no-idle), a także dyskusji innych szczególnych cech/własności rozważanych problemów wpływających na podejmowane decyzje. Stosowny przykład takich własności stanowi permutacyjny problem przepływowy z ograniczeniem bez przestojów, dla którego można wskazać instancje, w których *„...wymiana w systemie maszyny na wolniejszą może skutkować skróceniem pracy całej produkcji. Dodanie do istniejącego harmonogramu jeszcze dodatkowych zadań do wykonania może także skrócić czas całej produkcji.”* Cytat zaczerpnięty z pracy: M. Makuchowski, Nietypowe własności permutacyjnego problemu przepływowego z ograniczeniem bez przestojów, *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, tom I, 2015, 604-611.

Szkoda również, że efekty tak wielu, tak rzetelnie przeprowadzonych badań nie zostały należycie wyeksponowane w formie tabelarycznej ilustrującej taksonomię rozważanej klasy problemów szeregowania ze sprzężeniami czasowymi.

Części trzecia, obejmująca rozdział 6-ty, podejmuje próbę oceny weryfikacji zaproponowanej metodyki przedstawiając jej trzy przykładowe zastosowania. Pierwszy z nich, na przykładzie firmy **Elektrolux** produkującej artykuły gospodarstwa domowego ilustruje zastosowanie metody szeregowania rozłącznych przebrojeń w problemie przepływowym szeregowania zadań o opartej na heurystyce *Przeszukiwania z Zabronieniami* pozwalającej skrócić referencyjny harmonogram produkcji o bez mała 20%. Kolejne dwa rozważane przypadki dotyczą zagadnień marszrutyzacji pojazdów, odpowiednio samochodów ciężarowych firmy logistycznej zajmującej się spedycją towarów na terenie Stanów Zjednoczonych Ameryki oraz cystern w firmie zajmującej się odbiorem mleka od lokalnych dostawców. Rozważane w nich zagadnienia marszrutyzacji, po uprzednim przetransformowaniu do postaci przepływowych problemów szeregowania zadań z rozłącznymi przebrojeniami niezależnymi od kolejności, dają się rozwiązywać przy pomocy wcześniej opracowanych metod zwracających w rozważanych przypadkach rozwiązania nie gorsze od referencyjnych.

W podsumowaniu tej części, należy zauważyć, że wyniki, szeroko zakrojonych i bardzo rzetelnie przeprowadzonych, badań potwierdzających możliwość opracowania metod konkurencyjnych w stosunku do aktualnie dostępnych, składają się na oryginalny i ważki dorobek Doktoranta.

3. Oryginalne osiągnięcia

Zmierzając do osiągnięcia zamierzonych przez siebie celów, m.in. do opracowania autorskiego wyboru algorytmów optymalizacyjnych dla przepływowego problemu szeregowania zadań z arbitralnie wybranymi ograniczeniami czasowymi, Doktorant uzyskał szereg nowych rezultatów. Do ważniejszych z nich, wyróżniających je spośród dostępnych w literaturze przedmiotu, można zaliczyć:

1. Opracowanie nowych, uogólnionych modeli problemów szeregowania zadań uwzględniających ograniczenia implikowane występowaniem sprzężeń czasowych determinujących relacje łączące operacje kolejno wykonywane na tej samej maszynie.
2. Przeprowadzenie analizy wybranych, przepływowych problemów szeregowania zadań umożliwiającej identyfikację własności pozwalających na zmniejszenie rozmiaru przestrzeni rozwiązań poprzez zastosowanie tzw. własności eliminacyjnych.

3. Implementację tak wyznaczonych własności w dedykowanych algorytmach dokładnych i przybliżonych uzasadniającą potrzebę opracowania metodyki projektowania algorytmów dedykowanych problemem szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi.

4. Zaplanowanie i przeprowadzenie wielu czaso- i pracochłonnych eksperymentów obliczeniowych umożliwiających jakościową i ilościową ocenę proponowanej koncepcji metodyki. W szczególności potwierdzających jej praktyczną przydatność w zastosowaniu do wybranych przykładów przedsiębiorstw branży **AGD** oraz logistyki dostaw i zaopatrzenia.

Elementy nowości zaproponowanego podejścia przejawiają się tak w oryginalnym sformułowaniu problemów szeregowania zadań, jak i autorskich, proponowanych do ich rozwiązania, metodach implementujących modele matematyczne i grafowe, technikach analizy wybranych algorytmów optymalizacji, a także ich programowych implementacjach zrealizowanych w różnych środowiskach programistycznych, w tym również obliczeń współbieżnych.

Przedmiot badań, treść rozprawy oraz wykorzystane metody badawcze pozwalają stwierdzić, że rozprawa ma charakter teoretyczny i interdyscyplinarny. Zagadnienia w niej przedstawiane są związane z obszarami planowania i sterowania przebiegiem współbieżnie realizowanych dyskretnych procesów deterministycznych. Opracowane modele, stosowane w ich ocenie techniki analizy (w szczególności złożoności obliczeniowej), a także proponowane problemowo zorientowane metody szeregowania są dobrze osadzone w literaturze przedmiotu i wsparte licznymi eksperymentami obliczeniowymi.

Reasumując uważam, że uzyskane rezultaty potwierdzają dobre kwalifikacje Doktora, umożliwiające Mu swobodne poruszanie się zarówno w obszarach zagadnień z zakresu modelowania i projektowania układów automatyki, jak i z obszaru sterowanych przez nie układów mechanicznych. Zdobytą wiedzę w sposób profesjonalny potrafi implementować we współczesnych technikach programowania, pakietach oprogramowania statystycznego, a także zaawansowanych systemach symulacji komputerowej. Przedstawione kompetencje potrafi skutecznie wykorzystywać w podejmowaniu i samodzielnej realizacji zaplanowanych celów badawczych.

4. Uwagi

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

Uwagi ogólne:

1. Na tle licznych, bardzo rzetelnie przeprowadzonych analiz odczuwalny jest brak jakiegokolwiek próby uporządkowania metod i technik wykorzystywanych w wybranych problemach cząstkowych składających się na zarys koncepcji proponowanej metodyki. Warto zauważyć, że propozycja taksonomii tego typu problemów i związanych z nimi metod pozwoliłaby wypracować zasady podejmowania decyzji w stosownych systemach klasy DSS.
2. Interesującą, w kontekście wyżej wymienionej uwagi, byłaby również ocena możliwości implementacji opracowanej metodyki w wybranym systemie doradczym, a także ocena kompetencji oczekiwanych od potencjalnego użytkownika takiego systemu
3. W ramach permutacyjnego problemu szeregowania zadań z rozłącznymi przebrojeniami niezależnymi od kolejności rozważany jest problem samego szeregowania przebrojeń. Interesującym w tym kontekście byłoby dyskusja proponowanego w pracy rozwiązania z metodyką **SMED** (*Single Minute Exchange of Die*) umożliwiającą wyznaczenie kolejności przebrojeń wykorzystując zadaną macierz przebrojeń.

Uwagi szczegółowe:

Oprócz wcześniej już wspomnianych, wartościowych aspektów rozprawy warto również wskazać na braki stosownej korekty redakcyjnej. Brak tej staranności widać m.in. w wielu usterkach; przykładowe z nich dotyczą:

- niekompletnie i/lub niekonsekwentnie prowadzonego opisu cytowanej bibliografii, np.: [73], [79], [80], a także jej powtórzeń np.: „[20] Bozejko, W., R. Idzikowski, i M. Wodecki: *Flow Shop Problem with Machine Time Couplings*, t. 987. 2020, ISBN 9783030195007. [21] Bozejko, W., R. Idzikowski, i M. Wodecki: *Flow Shop Problem with Machine Time Couplings*. W: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, t. 987, str. 80–89, 2020, ISBN 9783030195007.”

lub też stylu narracji, np.: w jednym miejscu 137¹⁶ „W Podrozdziale 6.2 przedstawiono przykład przedsiębiorstwa logistycznego, które zajmuje się krajowym transportem towarów z centralnego magazynu [62].” natomiast w innym: 140²⁴ „...w firmie logistycznej zajmującej się spedycją towarów z centralnego magazynu. Firma zajmuje się wysyłaniem 24 transportów na terenie całych Stanów Zjednoczonych Ameryki...”,

- błędy formalne np.: w miejscu 100₂ „Dowód jest analogiczny jak dowód Własności 5.1...” winno być: „Dowód jest analogiczny jak dowód Własności 4.1...”, kolizja oznaczeń: 22² „...operacji a ...”, a w kolejnym wierszu: 22³ „... ma maszynie a ...”, błędny opis osi odciętych Rys. 5.4, błąd w zapisie ograniczenia (5.4) itp.
- usterki redakcyjne np.: 40₁₂ „...jeśli nasepiła poprawa...”, 106¹⁸ „Poprzez zastosowanie metoda TSS ...” 128¹⁵, „...chyba że są prowadzą do ...” 134⁵, „... dla dowolnej liczny maszyn ...”, itd. itp.
- niezręczności, skróty myślowe i/lub błędy stylistyczne np.: fraza 137³ „...metodologii rozwiązywania problemów ze sprzężeniami ...” winna być zastąpiona przez „metodyki rozwiązywania problemów ze sprzężeniami”,
- brak unifikacji zwrotów, terminów, zapisów itp. kwantyfikatory opisujące warunki/ograniczenia raz są wstawiane z lewej strony, np. (6.3) – (6.8), a raz z prawej strony, np. (5.60)–(5.62), raz jest: „...oparte na...” 68₃, innym razem 111₁₇ „...w oparciu o ...” itd.

Większość tego typu uwag przekazałem bezpośrednio Autorowi.

5. Konkluzja

Przytoczone uwagi krytyczne nie podważają mojej ogólnie pozytywnej oceny pracy. Pragnę stwierdzić, że przedstawiona do recenzji rozprawa wnosi wkład w rozwój metod szeregowania przepływowo realizowanych zadań ze sprzężeniami czasowymi. Uważam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Radosława Idzikowskiego rozwiązany został oryginalny problem badawczy, polegający na opracowaniu podstaw formalnych metodyki umożliwiającej wariantowanie algorytmów rozwiązywania przepływowych problemów szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi.

Doktorant wykazał się znajomością podstawowej literatury przedmiotu rozprawy, a uzyskane wyniki otrzymał odpowiednimi metodami badawczymi. Warto również podkreślić Jego rozległą wiedzę obejmującą znajomość szeregu metod optymalizacji kombinatorycznej, biegłe posługiwanie się interdyscyplinarnymi modelami obiektów (łączyącymi zagadnienia typowe dla różnych obszarów logistyki, automatyki, informatyki i badań operacyjnych), a także umiejętnością praktycznego wykorzystania nowoczesnych technik komputerowych.

Uważam, że opiniowana praca spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym w określeniu do rozpraw doktorskich ((Dz. U. z 2017 r., poz. 1789, „Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”) w dyscyplinie „**automatyka i robotyka**” (*Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.