

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mirosława Ławrynowicza

pt. „Algorytmy szeregowania zadań z nieustalonymi terminami gotowości na ma-
szynach dowolnych”

1. Obszar problemowy rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mirosława Ławrynowicza poświęcona jest zagadnieniom szeregowania zadań, w których wartości wybranych parametrów nie są precyzyjnie określone. Doktorant koncentruje się głównie na przypadkach, w których wartości terminów gotowości realizowanych zadań znane są w przybliżeniu (znany jest przedział czasu, w którym zadanie staje się gotowe do realizacji, jest to tzw. niepewność przedziałowa). W takich problemach główny nacisk kładzie się na poszukiwaniu harmonogramów minimalizujących wartość zadanej funkcji celu, w sposób podobny jak ma to miejsce w problemie deterministycznym (problemie z precyzyjnie ustalonymi terminami gotowości zadań). Różnica polega jednak na tym, że wykorzystywane funkcje celu charakteryzują „odporność” danego rozwiązania na zmienność parametrów niepewnych (w szczególności terminów gotowości). Problemy tego typu należą do klasy problemów harmonogramowania odpornego (ang. *robust scheduling*).

Tematyka optymalizacji odpornej (ang. *robust optimization*), obejmująca m.in. harmonogramowanie odporne, znana od wielu lat, jest wciąż aktualna (w szczególności w badaniach nad problematyką VRP). Świadczy o tym liczba spotykanych w praktyce problemów ciągle przewyższająca liczbę znanych metod i modeli. O niesłabnącym zainteresowaniu tą tematyką świadczy chociażby liczba publikacji, która w ostatniej dekadzie przekracza 2000 pozycji (*dane wg. bazy Scopus za lata 2013-2023*). Stosunkowo niewiele prac z tego zakresu porusza problematykę szeregowania zadań z nieustalonymi terminami gotowości ich wykonania. Brak precyzyjnie określonych terminów gotowości zadań często występuje w praktyce np. w systemach produkcyjnych, laboratoriach diagnostycznych, systemach obsługi klienta itp. W takich systemach wartości terminów gotowości zadań zależą od wielu (często nieznanymi) czynników

WPLYNĘŁO

06-09-2023

RJN-IT/160/2023

tj. czas obsługi klienta, termin dostawy zasobów koniecznych do rozpoczęcia zadania, termin gotowości aktualnie zajętej maszyny itp.

Tak rozumiany nieprecyzyjny charakter parametrów problemu wpływa znacząco na jego złożoność obliczeniową. Poza kilkoma szczególnymi, wskazanymi przez Doktoranta przypadkami, problemy szeregowania zadań z nieustalonymi terminami gotowości należą do klasy problemów NP-trudnych. Oznacza to, że nie należy się spodziewać czasowo efektywnych algorytmów ich rozwiązywania. Z tego powodu wykorzystanie metod dokładnych (gwarantujących wyznaczenie rozwiązań optymalnych) ogranicza się wyłącznie do problemów małej skali. W pozostałych przypadkach problemów (o skali spotykanej w praktyce) stosowane są głównie metody przybliżone. W szczególnych sytuacjach (ograniczających się do wąskich klas problemów) możliwa jest konstrukcja dedykowanych reprezentacji, które charakteryzują się własnościami pozwalającymi na projektowanie efektywnych algorytmów optymalizacyjnych. Inaczej mówiąc, poszukiwane są rozwiązania pozwalające na zwiększenie efektywności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych, poprzez pełniejsze wykorzystywanie tak własności ogólnych problemu, jak i własności jego aktualnie rozwiązywanej instancji. Możliwość budowy tego typu metod (algorytmów) dla wybranej klasy problemów szeregowania zadań stanowi motywację badań prowadzonych przez Doktoranta.

W tym ujęciu opiniowana rozprawa koncentruje się na zagadnieniach rozwiązywania szczególnego przypadku problemu optymalizacji odpornej, w którym poszukiwane jest uszeregowanie zadań minimalizujące tzw. kryterium maksymalnego żalu (kryterium to określa różnicę wartości funkcji celu względem rozwiązania optymalnego dla „najgorszego” scenariusza zmienności terminów gotowości zadań). W rozważanych instancjach problemu terminy gotowości zależą: od maszyn (wariant problemu: $Rm|r_{i,j}^- \leq r_{i,j} \leq r_{i,j}^+ | Reg(C_{max})$ – notacja *Grahama*) lub od zadań (wariant problemu: $Rm|r_j^- \leq r_j \leq r_j^+ | Reg(C_{max})$). Rozważany w dysertacji problem można zrekonstruować w następujący sposób. Dane są: zbiór maszyn oraz zbiór parametrów charakteryzujących realizowane na tych maszynach zadania. Terminy gotowości zadań nie są zadane w sposób precyzyjny (reprezentacja przedziałowa). Poszukiwane jest uszeregowanie zadań na maszynach (determinujące jednocześnie harmonogram ich realizacji), minimalizujący wartość kryterium maksymalnego żalu. Dla tak zdefiniowanego problemu prowadzone są poszukiwania własności umożliwiających budowę efektywnych metod poszukiwania rozwiązań optymalnych (inaczej mówiąc rozwiązań minimalizujących opóźnienie realizacji zadań w „najgorszym” scenariuszu zmienności terminów ich gotowości).

Uważam, że opiniowana rozprawa, podejmuje ważny i aktualny problem naukowy. Elementy nowości przejawiają się w autorskich algorytmach implementujących wykazane

w rozprawie własności. Podjęcie przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wielu praktycznych zastosowań związanych m.in. z systemami planowania i zarządzania przepływem produkcji.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana rozprawa liczy 183 strony i składa się z 6 rozdziałów, wykazu cytowanej literatury liczącego 160 pozycji, jednego dodatku oraz spisu stosowanych symboli. Załączona lista źródeł bibliograficznych obejmuje ważniejsze pozycje literaturowe z zakresu przedmiotu pracy. Warto podkreślić, że w bibliografii występuje 9 współautorskich publikacji Doktoranta. Dwie z nich zostały opublikowane w czasopiśmie: *International Journal of Industrial Engineering Computations* (IF = 3.3) oraz *Kybernetes* (IF=2.5) indeksowanych w Journal Citation Reports.

W rozprawie wyodrębnić można trzy zasadnicze części. W części pierwszej (obejmującej rozdziały 1-2) sformułowano tezę rozprawy, jej cel oraz przedstawiono podstawowe pojęcia i stan wiedzy z zakresu problemów odpornego szeregowania zadań. W szczególności przedstawiono sformułowanie deterministycznego problemu szeregowania zadań z terminami gotowości zależnymi od maszyn ($Rm|r_{i,j}|C_{max}$), stanowiący punkt wyjścia do rozważań podejmowanych w dalszej części rozprawy. Na jego przykładzie przeprowadzona została analiza złożoności obliczeniowej oraz ocena efektywności trzech wybranych algorytmów: przegląd zupełny (ang. *Brute Force* w skrócie BF), symulowane wyżarzanie (ang. *Simulated Annealing* w skrócie SA), algorytm zachłanny (ang. *Greedy Algorithm* w skrócie GD). Przyjęta formuła prezentacji jest w większości przypadków jasna i precyzyjna, miejscami jednak brakuje autorskich krytycznych refleksji Doktoranta. Przykładem tego jest brak stosownego komentarza argumentującego wybór przyjętych do rozważań algorytmów. Nie wiadomo, jakie własności tych algorytmów zadecydowały o tym, że stały się one przedmiotem prowadzonych badań.

Pewien niedostatek odczuwalny jest w zakresie przeprowadzonego przeglądu literatury. Z jednej strony bardzo szczegółowo scharakteryzowano klasyfikację spotykanych w literaturze optymalizacyjnych problemów odpornego szeregowania zadań, z drugiej zaś strony nie podjęto dyskusji problemów decyzyjnych zakładających możliwość braku istnienia jakiegokolwiek rozwiązania dopuszczalnego. W odróżnieniu od problemów analizowanych w rozprawie (problemów optymalizacyjnych wykorzystujących kryterium funkcji żalu) w problemach decyzyjnych poszukuje się rozwiązania gwarantującego spełnienie wszystkich zadanych ograniczeń bez względu na zaistniały scenariusz wartości niepewnych parametrów. Interesującą w tym

kontekście wydaje się być możliwość wykorzystania zaproponowanych w rozprawie algorytmów do rozwiązywania tego typu problemów decyzyjnych. W przeprowadzonym przeglądzie literatury brakuje również uzasadnienia potrzeby podjęcia tematu rozprawy akcentującej perspektywy praktycznych zastosowań. W dalszej części rozprawy (rozdział 5) Doktorant, przedstawia różne przykłady praktycznego wykorzystania opracowanych metod, jednak z pominięciem potrzeb wynikających z przemysłowych zastosowań.

W części drugiej (rozdziały 3-4) zawierającej główne (poznawcze) wyniki rozprawy, przedstawiono autorskie metody szeregowania zadań z przedziałowymi (niepewnymi) terminami gotowości. Doktorant rozważał kolejno trzy wybrane instancje obejmujące:

- problem szeregowania zadań, w którym przedziałowe terminy gotowości zależą od maszyn: $Rm|r_{i,j}^- \leq r_{i,j} \leq r_{i,j}^+ | Reg(C_{max})$,
- problem szeregowania zadań, w którym przedziałowe terminy gotowości zależą od zadań: $Rm|r_j^- \leq r_j \leq r_j^+ | Reg(C_{max})$,
- problem rozmieszczenia maszyn i szeregowania zadań (ang. *Scheduling and Location*, w skrócie Scheloc).

Pierwsze dwie instancje problemu są przedmiotem rozważań rozdziału 3. Dla każdego z rozważanych wariantów Doktorant przedstawił zbiór heurystycznych algorytmów: D_Regret DR , G_Regret (GR), $Tabu Search$ (TS) dla $Rm|r_{i,j}^- \leq r_{i,j} \leq r_{i,j}^+ | Reg(C_{max})$ oraz S_Regret (SR) dla $Rm|r_j^- \leq r_j \leq r_j^+ | Reg(C_{max})$, bazujących na sformułowanych własnościach analizowanych problemów. Należy podkreślić, że przyjęty sposób narracji tej części rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu i wysokich kompetencjach Doktoranta. Rzetelność Doktoranta w prowadzeniu badań potwierdza w szczególności sposób przeprowadzenia dowodów poszczególnych własności. W rozprawie wykazanych zostało 6 własności, wśród których należy wyróżnić własność orzekającą, że: *nie można zaprojektować algorytmu α -aproxymacyjnego dla problemu, w którym przedziałowe terminy gotowości zależą od maszyn*. W rozdziale 3 przedstawiono również wyniki przeprowadzonych eksperymentów ilościowych. Na ich podstawie oceniono efektywność zaproponowanych algorytmów i tym samym potwierdzono wcześniej przedstawione wyniki teoretyczne. Na uwagę zasługuje przeprowadzona analiza statystyczna, która potwierdza, że algorytm GR wyznacza rozwiązania zapewniające statystycznie mniejszą długość uszeregowania niż algorytmy TS , DR i SR .

Wymienionym wyżej instancjom problemu poświęcono bardzo dużo uwagi, jednak najciekawszym elementem tej części rozprawy jest rozdział 4, w którym Doktorant proponuje autorską reprezentację problemu rozmieszczania maszyn i szeregowania zadań z przedziałowymi

terminami gotowości (*ScheLoc*). W problemie tym zakłada się, że maszyny, na których realizowane są zadania, wymagają rozmieszczania (np. rozmieszczenie na płaszczyźnie) a ich lokalizacja wpływa na terminy gotowości zadań. Dla tak sformułowanego problemu Doktorant opracował serię algorytmów: *Exhaustive (EX)*, *ExGreedy (EG)*, $\{DR, GR, SR\}+EX$, *Hybrid (HS)*, *Genetic (GN)* itd. oraz przeprowadził eksperymenty ilościowe potwierdzające ich efektywność.

Pewnym niedostatkiem tej części rozprawy jest brak końcowego podsumowania w zakresie potencjalnych zastosowań otrzymanych rozwiązań. W mojej opinii wartościowe byłoby tabelaryczne zestawienie istotnych cech zaproponowanych algorytmów uwypuklających ich wady, zalety oraz rekomendowany zakres ich zastosowań.

W części trzeciej (rozdział 5) przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla przypadków:

- harmonogramowania produkcji obwodów drukowanych PCB,
- planowania infrastruktury przemysłowej,
- szeregowania wykonywania kodów źródłowych.

Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły praktyczne znaczenie zaproponowanych algorytmów. Szkoda tylko, że ostatni z analizowanych przypadków użycia (wg. mnie najciekawszy) ograniczał się wyłącznie do rozważań teoretycznych bez stosownego przykładu ilustrującego.

3. Oryginalne osiągnięcia

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy, wyróżniających je spośród dostępnych w literaturze przedmiotu, można zaliczyć:

1. Sformułowanie trzech wariantów problemu szeregowania zadań z nieustalonymi terminami gotowości: $Rm|r_{i,j}^- \leq r_{i,j} \leq r_{i,j}^+ | Reg(C_{max})$, $Rm|r_j^- \leq r_j \leq r_j^+ | Reg(C_{max})$ oraz *ScheLoc*,
2. Wykazanie własności umożliwiających opracowanie czasowo efektywnych algorytmów odpornego szeregowania zadań.
3. Zaproponowanie i przeanalizowanie szeregu algorytmów optymalizacyjnych: *D_Regret*, *DR*, *G_Regret (GR)*, *S_Regret (SR)*, *Exhaustive (EX)*, *ExGreedy (EG)*, $\{DR, GR, SR\}+EX$, *Hybrid (HS)* itd.
4. Zaplanowanie oraz przeprowadzenie szeregu eksperymentów i analiz porównawczych weryfikujących efektywność opracowanych algorytmów.

5. Wykazanie, że opracowane algorytmy są bardziej efektywne (uzyskują mniejsze wartości funkcji celu) niż algorytmy bazujące na uniwersalnych metaheurystykach tj. Tabu Search i Symulowane Wyżarzanie.

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowe uważam, że Doktorant zrealizował cel rozprawy. Uzyskane rezultaty potwierdzają kompetencje Doktoranta w obszarach z zakresu modelowania problemów szeregowania zadań, metod optymalizacji dyskretnej, a także technik programowania i planowania eksperymentów komputerowych. Dowodzą również, że Doktorant potrafi podejmować i samodzielnie realizować zaplanowane cele badawcze.

4. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

1. W rozdziale 2.6. przedstawiono implementację modelu problemu $Rm|r_{i,j}| Cmax$ (wariant deterministyczny) w środowisku programowania deklaratywnego CPLEX oraz przeprowadzono serię eksperymentów obliczeniowych. Niekoniecznie budzi brak podobnej analizy dla problemów z nieustalonymi terminami gotowości: $Rm|r_{i,j}^- \leq r_{i,j} \leq r_{i,j}^+ | Reg(Cmax)$, $Rm|r_j^- \leq r_j \leq r_j^+ | Reg(Cmax)$ oraz ScheLoc (warianty niedeterministyczne). Nawet jeśli implementacja wprost okazałaby się nieefektywna, techniki te mogłyby stanowić element składowy opracowanych algorytmów np. algorytmów bazujących na dekompozycji problemu. Naturalnym w tym kontekście staje się zatem pytanie: Czy tego typu badania były prowadzone?
2. W rozdziale 5 w przykładzie 1 poruszone zostało zagadnienie, w którym wykluczenie jednego zadania z realizacji (zadanie 14) spowodowało zmniejszenie wartości funkcji żalu o ponad 58 [h] (z 82 do 23,33). Interesującym staje się pytanie, w jakim stopniu opracowane algorytmy mogą zostać wykorzystane przy wsparciu selekcji (syntezy) danych wejściowych (zleconych zadań), tak aby mogły skutkować oczekiwaną wartością funkcji żalu? Innymi słowy, czy możliwe jest określenie podzbioru zleconych zadań, który gwarantuje opóźnienie ich realizacji (w najgorszym przypadku) na zadanym poziomie?
3. Analiza przeprowadzona w rozdziałach 2-4 doprowadziła do sformułowania (i wykazania) 9 własności oraz opracowania 14 algorytmów. W kontekście tak dużej liczby zaproponowanych rozwiązań ciekawym wydaje się opracowanie zbioru wytycznych (dobrych praktyk) określających warunki, w jakich należy stosować określony algorytm. Czy z perspektywy przeprowadzonych badań można opracować swoisty „przewodnik użytkownika” wspierający dobór algorytmu do określonej instancji problemu?

4. Czy na podstawie wykazanych własności można określić „odporność” zadanej instancji problemu? Innymi słowy czy można przewidzieć graniczne wartości funkcji celu?

Pomijając powyżej wymienione uwagi należy zaznaczyć, że rozprawa jest zredagowana bardzo starannie, posiada właściwą strukturę i proporcje. Błędy językowe i stylistyczne prawie nie występują.

5. Konkluzja

Reasumując stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej pana mgr. inż. Mirosława Ławrynowicza rozwiązany został oryginalny problem badawczy, polegający na opracowaniu i analizie autorskich wersji algorytmów szeregowania zadań z nieustalonymi terminami gotowości (reprezentacja przedziałowa). Doktorant wykazał się znajomością podstawowej literatury przedmiotu rozprawy, umiejętnościami: modelowania problemów szeregowania zadań, budowy i komputerowej implementacji metod optymalizacji dyskretnej, a także umiejętnościami prowadzenia eksperymentów obliczeniowych.

Uważam, że opiniowana rozprawa spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742) w dyscyplinie **Informatyka techniczna i telekomunikacja** i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

