

Zielona Góra, 27.08.2021r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak  
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych  
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki  
Uniwersytet Zielonogórski  
Ul. Podgórna 50  
65- 246 Zielona Góra  
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Mgra inż. Radosława Idzikowskiego**  
**pod tytułem**

### **„Algorytmy optymalizacyjne dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi”**

**opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej.**

#### **I. Problem naukowy i obszar rozprawy**

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej są algorytmy optymalizacyjne dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Głównym aspektem poruszonym w pracy jest zastosowanie algorytmów optymalizacji dla każdego wariantu problemów przepływowych w bazując na modelach matematyczne i graficzne. Problem z algorytmami prezentuje się w następujący sposób: brak algorytmów dokładnych o wielomianowej złożoności obliczeniowej powoduje, że niezbędne jest zastosowanie nowych technik do istniejących już algorytmów lub stworzenie procedur o podobnym działaniu, które wykorzystywałyby środowiska wielowątkowe, takie jak wielordzeniowe procesory, karty graficzne czy klastry obliczeniowe. Rozprawa dotyczy również propozycji nowych modeli, które sprawdziłyby się zarówno w zastosowaniu praktycznym, jak i w dostosowaniu już istniejących metod. Ze względu na występowanie ograniczeń w szeregowaniu zadań, autor dokonał dogłębnej analizy algorytmów optymalizacyjnych dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi.

**Teza pracy** sprowadza się do wykazania, że wykorzystując specyficzne własności problemów oraz metod projektowania algorytmów możliwe jest:

**WPLYNĘŁO**

**31-08-2021**

**ADN-AEE/135/2021**

- zaproponowanie nowych, bardziej ogólnych względem klasycznych podejść, modeli problemów szeregowania zadań z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń dotyczących zależności pomiędzy operacjami, tzw. sprzężeń czasowych;
- zmniejszenie rozmiaru przestrzeni rozwiązań problemów szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi poprzez zastosowanie tzw. własności eliminacyjnych.
- zaprojektowanie dedykowanych algorytmów dokładnych i przybliżonych dla rozważanych klas problemów;
- przyspieszenie obliczeń dzięki wykorzystaniu środowisk równoległych.

Natomiast do najważniejszych zadań badawczych należy:

- przedstawienie modeli matematycznych oraz grafowych znanych z literatury oraz rozszerzonych o rozłączne przebrojenia lub sprzężenia czasowe;
- udowodnienie własności eliminacyjnych dla zaproponowanych modeli;
- opracowanie efektywnych, dedykowanych algorytmów dokładnych, przybliżonych oraz równoległych;
- przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych z wykorzystaniem danych testowych z literatury oraz nowych, wygenerowanych losowo.

Podsumowując, rezultatem praktycznym pracy jest stworzenie aplikacji opracowanych metodologii rozwiązywania problemów ze sprzężeniami czasowymi.

## II. Koncepcja i struktura rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera 7 rozdziałów oraz bibliografię obejmująca 148 pozycji, które doskonale prezentują zasób wiedzy w zakresie szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Praca została podzielona na trzy części. Część pierwsza skupia się na klasyfikacji problemów i metodach szeregowania zadań, jest to uzupełnienie wiedzy pod kątem teoretycznym. Część druga opisuje własności i algorytmy dla problemów przepływowych z uwzględnieniem modeli matematycznych, tablic oraz grafów. Część trzecia poświęcona jest praktycznym zastosowaniom zaproponowanych metod, optymalizacji dyskretnej oraz przedstawieniu metod i aplikacji wspomagających zarządzanie flotą pojazdów w przedsiębiorstwach. Rozdziały od 4'ego do 7'ego prezentują wyniki naukowe Doktoranta w zakresie algorytmów optymalizujących, które znalazły zastosowanie dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Wybrane rozdziały stanowią również podstawę pracy doktoranta.

**W rozdziale 1** została poruszona kwestia poprawy efektywności stosowania nowych technik do istniejących algorytmów i tworzenia procedur równoległych, które wykorzystują środowiska wielowątkowe. Opisano konsekwencje użycia zbyt prostego modelu. Autor w zwięzły sposób przedstawił kierunek badań rozwijany w rozprawie doktorskiej obejmując tezy oraz proces badawczy. Jest to wprowadzenie do teorii szeregowania zadań w oparciu o literaturę.

**W rozdziale 2** przedstawiono elementy teorii szeregowania zadań. Wytłumaczono sposób w jaki można rozwiązać wybrany problem przy uwzględnieniu aspektu zbudowania

odpowiedniego modelu matematycznego. Opisano rodzaje problemów szeregowania zadań w oparciu o przykłady z literatury. Przedstawiono wyniki badań i sformułowano własności dla różnych wariantów problemów przepływowych oraz. Opracowano szczegółowy model matematyczny oraz grafowy dla FSSP i PFSSP. Autor skonstruował modele grafowe dla każdego z rozwiązań. Przybliżono temat przebrojeń dla klasycznych wariantów problemów szeregowania zadań. Autor skupił się na dogłębnym ukazaniu algorytmów dla przypadków z identycznymi lub jednostkowymi czasami wykonywania operacji oraz przebrojeń. Zaproponowano własności dla problemu dwumaszynowego. Poddano analizie rozłączne przebrojenia. Rozpatrzono ograniczenia technologiczne oraz zaproponowano nowe parametry dla problemów przepływowych. Przedstawiono wzory na dwie klasy funkcji celu: maksymalizacyjna i sumacyjna. Opisano klasyfikację problemów szeregowania zadań przy uwzględnieniu notacji Grahama.

**Rozdział 3** został poświęcony metodom przybliżonym, które są stosowane w celu znalezienia rozwiązania optymalnego. Opisano szczegółowo metody dokładne i przybliżone. Wydzielono podrozdział dla algorytmów populacyjnych w celu lepszego zrozumienia tematu. W niniejszym rozdziale przejrano metody i zaproponowano ich klasyfikację w oparciu o literaturę. Wyznaczono rozwiązania referencyjne dla małych rozmiarów instancji problemów ze sprzężeniami czasowymi. Wyjaśniono zastosowanie algorytmów konstrukcyjnych.

**W rozdziale 4** opisano proces szeregowania zadań w oparciu o proces związany z betonowaniem w ramach harmonogramowania procesów budowlanych. Opisano permutacyjny i nie permutacyjny problem szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. W celu zrozumienia tematu sformułowano model matematyczny i grafowy. Przebadano kryterium optymalizacyjne, czyli czas zakończenia wykonywania wszystkich operacji. Dokonano obliczeń i badań z wykorzystaniem algorytmu Floyda-Warshalla. Autor omówił możliwe wyniki zastosowania proponowanej metody obliczeń równoległych w algorytmach optymalizacyjnych. Udowodniono własności eliminacyjne koncepcji bloków prawostronnych i lewostronnych w modelu grafowym.

**W rozdziale 5** podjęto się rozwiązanie zagadnienia PFSSP (ang. Permutation Flow Shop Scheduling Problem) z ciągłą pracą maszyn i klasycznymi przebrojeniami. Przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem różnych algorytmów. Wyjaśniono proces wykonywania operacji w ramach każdego zadania. Przedstawiono metodę wyznaczającą harmonogram dosunięty w lewo włącznie z uwzględnieniem złożoności obliczeniowej. Sformułowano własność o braku cykli dodatnich, dopuszczalności rozwiązań, tworzeniu harmonogramu oraz definicji dedykowanego sąsiedztwa. Opisano sposób rozwiązywania problemu przy użyciu dwóch algorytmów: Algorytmu Genetycznego i Przeszukiwania z Zabronieniami. Przedstawiono cele eksperymentów obliczeniowych i warunki zatrzymania algorytmu w trzech wersjach. Zidentyfikowano własność eliminacyjną bazującą na blokach oraz zaproponowano procedurę udoskonalenia pojedynczego dopuszczalnego rozwiązania. Skonstruowano metodę potencjalnej poprawy rozwiązania przy użyciu prostych zamian z kolejności wykonywania przebrojeń. Na podstawie zaprezentowanej procedury wykazano złożoność obliczeniową metody bazującej na idei sortowania bąbelkowego. Opisano zastosowania procedury udoskonalania i działania algorytmu zachłannego dla dwóch maszyn. Wyjaśniono zależność między złożonością obliczeniową algorytmu, a liczbą przebrojeń i

maszyn. W oparciu o tablice opisano wydajność algorytmu heurystycznego w różnych grupach instancji. Opisano również wykorzystanie proponowanych metod w przyszłości.

**W rozdziale 6** przedstawiono aplikację opracowaną w celu rozwiązywania problemów ze sprzężeniami czasowymi. W oparciu o współpracę z zewnętrznymi firmami zobrazowano rozważane zagadnienia w bardziej precyzyjny sposób. Za pomocą tabeli przedstawiono instancję problemu stworzonego na podstawie rzeczywistych danych uzyskanych z przedsiębiorstwa. Wyjaśniono zasadę działania harmonogramu. Zaprezentowano zastosowanie metod szeregowania zadań do rozwiązywania rzeczywistego problemu ze sprzężeniem czasowym. Podjęto próbę rozpatrzenia tego, jak działa proces szeregowania zadań na równoległych maszynach. Przedstawiono zarys powstałego prototypu aplikacji.

**Rozdział 7** jest podsumowaniem rozprawy i stanowi całość sformułowanych wniosków. Podsumowano pracę uwzględniając jej najważniejsze elementy. Precyzyjnie opisano kierunki dalszych badań oraz poruszono aspekt implementacji dedykowanych algorytmów w środowiskach równoległych.

### III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było przedstawienie zastosowania algorytmów optymalizacyjnych dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Zgodnie z zaprezentowaną wiedzą, dowodami popartymi obliczeniami oraz obecnym stanem wiedzy udowodniono postawione wcześniej tezy. Autor przeanalizował konkretne algorytmy optymalizacyjne dla każdego z problemów szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Opracowanie modeli matematycznych oraz grafowych dla problemów przepływowych szeregowania zadań z uwzględnieniem sprzężeń czasowych, gdzie pojawiają się dodatkowe relacje między operacjami.
- Opracowanie modeli z przebrojeniami na przykładzie problemu przepływowego szeregowania zadań.
- Zaprojektowanie modeli, które uwzględniają rozłączne przebrojenia w sytuacji, gdy na raz może być wykonywane tylko jedno przebrojenie ze względu na ograniczenia technologiczne.
- Zdefiniowanie własności eliminacyjnej bazującej na blokach zadań ze ścieżki krytycznej.
- Opracowanie metod wyznaczania funkcji celu, w czasie  $O(nm)$  z uwzględnieniem dodania łuków powrotnych w modelach grafowych;
- Znaleziono rozwiązanie dla niepermutacyjnego problemu przepływowego szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi proponując równoległy algorytm obliczania wartości funkcji celu bazując na schemacie działania algorytmu Floyda-Warshalla.

Zaproponowane metody i przeprowadzone badania umożliwiają użycie algorytmów optymalizacyjnych dla problemu szeregowania zadań ze sprzężeniami czasowymi. Świadczy

to o osiągnięciu przez Autora celu postawionego we wstępnej części pracy zdefiniowanego w postaci Tezy pracy

Dorobek naukowy autora w kontekście publikacji związanych z rozprawą obejmuje 7 publikacji, w tym jeden artykuł w czasopiśmie Archives of Control Sciences:

- Cyclic flow shop scheduling problem with two-machine cells (2017, 100 pkt);

i jeden w czasopiśmie Applied Sciences:

- Solving Non-Permutation Flow Shop Scheduling Problem with Time Couplings (2021)

oraz 5 publikacji w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych takich jak:

- International Conference on Dependability and Complex Systems 2019, 2020
- 8th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications 2017
- Performance Evaluation Models for Distributed Service Networks 2021
- IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE) 2020

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Radosław Idzikowski zrealizował cel rozprawy, udowodnił postawione tezy oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych automatyki i robotyki.

#### **IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy**

1. W punkcie 3.2 autor wprowadza kryterium oceny jakości funkcjonowania algorytmu przybliżonego opisane wzorem (3.5). W szczególności, stanowi ono procentowe względne odchylenie w stosunku do rozwiązania referencyjnego uważanego za wzorcowe. Pomimo niewątpliwej użyteczności takiej miary może ona prowadzić do błędnych wniosków na temat funkcjonowania danego algorytmu. W skrajnym przypadku można wyobrazić sobie przypadkowe i niepowtarzalne znalezienie rozwiązania optymalnego przez dany algorytm. Dlatego lepszym rozwiązaniem służącym do oceny jakości funkcjonowania algorytmów przybliżonych wydaje się zastosowanie teorii stochastycznej odporności, która sprowadza się do maksymalizacji miary jakości funkcjonowania algorytmu optymalizacji dla różnych warunków początkowych. Jako przykład ilustracyjny podaję odwołanie do pracy:
  - Witczak, Marcin, and Przemysław Pretki. "Design of an extended unknown input observer with stochastic robustness techniques and evolutionary algorithms." International Journal of Control 80.5 (2007): 749-762.
2. Algorytmy optymalizacji stochastycznej przedstawione w punkcie 3 mają szereg istotnych parametrów wpływających na jakość ich funkcjonowania. Czy i jak autor próbował analizować zależności między powyższymi parametrami a jakością otrzymywanych rozwiązań? Czy z powyższych wniosków wynikać mogą wnioski odnośnie opracowania adaptacyjnych metod strojenia takich parametrów?
3. W rozdziale 4, autor przedstawia algorytmy przeszukiwania snopowego, z zabronieniami oraz sztuczną kolonię pszczół. Brakuje jednak przedstawienia przykładowej reprezentacji rozwiązania dla tych algorytmów, która powinna

- uniemożliwić otrzymywanie rozwiązań niedopuszczalnych. Poszczególnym fazom algorytmu sztucznej kolonii pszczoł powinna również być poświęcona większa uwaga.
4. Pomimo niewątpliwej użyteczności zaproponowanych algorytmów, ich zastosowanie może być ograniczone w sytuacjach, w których dochodzi do opóźnień związanych z realizacją danego zadania. Takie opóźnienie powinno być kompensowane poprzez odpowiednie działania prewencyjne związane z alternatywnym szeregowaniem postawionych zadań. Oznacza to minimalizację ich wpływu na całościowy czas realizacji zadań w określonym horyzoncie czasowym. Czy zdaniem autora istnieje możliwość rozszerzenia zaproponowanych algorytmów do rozwiązania takiego problemu?

#### **V. Podsumowanie recenzji**

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę, która wyraźnie wykracza ponad poziom przeciętny.

Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta w zakresie automatyki i robotyki. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Radosława Idzikowskiego rozprawa spełnia warunki określone w artykule 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.

