

dr hab. inż. Marek Karkula, prof. AGH

Kraków, 15.06.2017

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica

Wydział Zarządzania

ul. Gramatyka 10, 30-067 Kraków

☎ 12 617 43 30

✉ mkarkula@zarz.agh.edu.pl

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Więcka, pt.:

### **Zastosowanie narzędzi sztucznej inteligencji w sterowaniu zapasami towarów w warunkach niepewności**

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Andrzej Adamski

Podstawa formalna opracowania recenzji: pismo Pana dr hab. inż. Andrzeja Szaraty, prof. PK, Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej (C000.520/528/2017 z dnia 24 kwietnia 2017 roku), do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

#### **1. Ocena doboru i aktualności tematu rozprawy**

Tematyka rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Pawła Więcka dotyczy istotnego i aktualnego zagadnienia sterowania poziomem zapasów towarów z uwzględnieniem niepewności popytu, czasu dostawy oraz dostępności towaru u dostawcy. Należy podkreślić, że zagadnienie to dla większości organizacji w dowolnym sektorze gospodarki stanowi poważne wyzwanie. Kontrola przepływu materiałów od dostawców surowców do odbiorców końcowych ma obecnie znaczenie zarówno na poziomie strategicznym, taktycznym, jak i operacyjnym i jest w pełni doceniona przez kierownictwo najwyższego szczebla. Kontrola zapasów nie może być oddzielona od innych funkcji, takich jak zaopatrzenie, produkcja, dystrybucja, czy transport. Odpowiednia lokalizacja zapasów w łańcuchu logistycznym i określenie tzw. punktów rozdzielających oraz kształtowanie poziomów zapasów mają wpływ na realizację procesów logistycznych, transportowych produkcyjnych i innych. W rzeczywistości celem kontroli zapasów jest często balansowanie wokół sprzecznych celów – z jednej strony poszukiwania minimum kosztów, a z drugiej strony dążenia do maksymalizacji poziomu obsługi klienta. Z tego powodu należy uznać, że przedstawiona do recenzji praca porusza aktualną i wpisującą się w nowoczesne trendy problematykę sterowania zapasami z uwzględnieniem warunków niepewności. Tematykę rozprawy uważam za istotną i oryginalną zarówno ze względów poznawczych, jak i utylitarnych. Pomimo dużej liczby publikacji dotyczących naukowych metod kontroli i sterowania zapasami można zaobserwować lukę teoretyczną, metodyczną i empiryczną w obszarze przedmiotowym badań. Dotyczy ona braku koncepcji, narzędzi i modeli pozwalających ująć problematykę sterowania zapasami w sposób systemowy, uwzględniając przy tym wpływ czynników niepewnych. Moim zdaniem postawiony w pracy problem można postrzegać jako próbę wypełniania tych luk.

## 2. Układ rozprawy

Treść pracy została przedstawiona na 166 ponumerowanych stronach wydruku komputerowego formatu A4, a jej kompozycja zawiera: streszczenia w języku polskim i angielskim, sześć rozdziałów, zestawienie literatury, spisy rysunków i tabel oraz dwa załączniki, w których Doktorant zaprezentował część wyników swoich badań. Rozprawę wzbogaca materiał ilustracyjny i tabelaryczny, składający się z 66 rysunków oraz 16 tabel.

Podstawowe wyniki rozprawy są efektem badań i eksperymentów wspartych starannym rozpoznaniem literaturowym. Dobór źródeł nie budzi zastrzeżeń – zawiera 155 pozycji (26 krajowych i 129 anglojęzycznych), a Doktorant jest autorem jednej z nich. Nie brakuje najnowszych pozycji z obszaru przedmiotowego rozprawy, a zestawienie literatury cechuje kompletność opisów bibliograficznych.

## 3. Analiza zakresu, celu i charakterystyka treści pracy

Dysertacja składa się z dwóch warstw, teoretycznej i empirycznej, które wzajemnie się uzupełniają, tworząc logiczną całość. W pracy Autor podjął próbę opracowania inteligentnej metody sterowania zapasami w warunkach niepewności z wykorzystaniem metod i narzędzi sztucznej inteligencji. Treść kolejnych rozdziałów powiązana jest z tytułem rozprawy oraz koresponduje z celami i przyjętymi tezami pracy.

W **początkowym rozdziale** zatytułowanym „Wstęp” (6 str.) Autor przedstawił genezę podjęcia tematu rozprawy, słusznie podkreślając wagę i złożoność problematyki sterowania zapasami. Analiza dorobku literaturowego z tego obszaru skłoniła Doktoranta do stwierdzenia, że mimo wielu opracowań brak jest kompleksowych i systemowych propozycji rozwiązań uwzględniających jednoczesny wpływ różnych czynników niedeterministycznych na decyzje podejmowane w obszarze zapasów. Taki stan zagadnienia uzasadnia potrzebę opracowania odpowiednich metod sterowania zapasami z uwzględnieniem warunków niepewności.

Do rozważań naukowych Doktorant przyjął następującą tezę badawczą:

*Systemowe wykorzystanie dedykowanych technik sztucznej inteligencji istotnie wpływa na zwiększenie efektywności w zakresie logistyki zapasów w warunkach niepewności.*

Uzupełnia ją teza pomocnicza w brzmieniu:

*Zastosowanie hybrydowych modeli prognostycznych umożliwia zmniejszenie poziomu niepewności w odniesieniu do predykcji popytu na dostawy towarów.*

W tej części rozprawy Autor sprecyzował cele i zakres badań własnych. Głównym celem dysertacji było

*„...opracowanie inteligentnej metody sterowania zapasami w warunkach niepewności z wykorzystaniem dedykowanych metod i narzędzi sztucznej inteligencji”,*

natomiast za cele pośrednie przyjęto:

1. *Ukazanie możliwych korzyści oraz zysków ze stosowania metod sztucznej inteligencji w obszarze sterowania zapasami.*



2. *Opracowanie propozycji umiejscowienia podejmowanej problematyki kontrolowania poziomu zapasów w warunkach niepewności z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji w hierarchicznej koncepcji Inteligentnych Zintegrowanych Systemów Logistycznych.*

Stwierdzam, że zarówno sformułowane tezy badawcze, jak i cele pracy nie budzą zastrzeżeń. Rozdział kończy spis najważniejszych akronimów (a nie jak podaje Autor skrótów) i oznaczeń. Spis ten według mnie lepiej byłoby umieścić na początku rozprawy.

**Rozdział drugi** zatytułowany „Wybrane elementy magazynowania i sterowania zapasami” (24 str.) stanowi teoretyczne wprowadzenie do omawianych w rozprawie zagadnień związanych ze sterowaniem zapasami. W tej części rozprawy mgr inż. Paweł Więcek m.in. omówił znaczenie i funkcje magazynów w sieciach dostaw oraz przedstawił istotę i funkcje zapasów. Obszerną i istotną część rozdziału stanowi charakterystyka metod i modeli sterowania zapasami przygotowana na podstawie aktualnej literatury przedmiotu. Doktorant przedstawił kryteria ich klasyfikacji oraz szczegółowo omówił najważniejsze grupy metod i modeli sterowania. Za cenne należy uznać zaprezentowane porównanie przedstawionych metod oraz ich krytyczna ocena, a przedstawione wnioski świadczą o dobrym rozeznaniu Doktoranta stanu zagadnienia w tym obszarze. W podrozdziale 2.3 zwrócono uwagę na najważniejsze składowe kosztów obsługi zapasów, a w końcowym fragmencie rozdziału scharakteryzowano miary efektywności w odniesieniu do sterowania zapasami. W tej części pracy dużo uwagi poświęcono niezwykle istotnemu parametrowi mającemu wpływ na decyzje w obszarze sterowania zapasami, a mianowicie poziomowi obsługi klienta, definiowanemu jako stopień gotowości obsłużenia popytu z zapasu.

Moim zdaniem podrozdział 2.1 („Znaczenie i funkcje magazynów w logistycznych sieciach dostaw”) mógłby zostać pominięty, ponieważ procesy magazynowania nie są przedmiotem niniejszej rozprawy. W związku z tym należałoby także zmodyfikować tytuł rozdziału, np. na „Wybrane elementy sterowania zapasami”.

W **rozdziale trzecim** pt. „Znaczenie analizy i predykcji popytu w procesie sterowania zapasami towarów” (11 str.) Doktorant scharakteryzował zjawisko popytu i jego związek ze sterowaniem zapasami. Popyt i jego właściwa analiza i prognoza mają decydujący wpływ na kształtowanie poziomu zapasów. Rozdział został podzielony na dwa podrozdziały. W pierwszym z nich zreferowano zagadnienie wyboru metody sterowania zapasami. Szkoda, że Autor przedstawił to zagadnienie w encyklopedycznym skrócie, odwołując się przy tym głównie do dwóch powszechnie znanych metod klasyfikacji zapasów – ABC oraz XYZ. W podrozdziale 3.2 podjęto dyskusję dotyczącą identyfikacji, estymacji i prognozowania popytu. W tej części pracy Doktorant skoncentrował się na charakterystyce podstawowych modeli prognozowania popytu rozpatrywanego jako szeregi czasowe. Brakuje tutaj moim zdaniem głębszego odniesienia i komentarza do modeli wykorzystywanych w późniejszych częściach pracy dotyczących m.in. modeli ARIMA czy sztucznych sieciach neuronowych (przedstawionych w kolejnym rozdziale). Rozdział kończy analiza źródeł niepewności dotyczących kształtowania popytu na towary i ich zapasów.

Kolejne rozdziały stanowią zasadniczą część rozprawy, a zaprezentowane w nich wyniki badań są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktoranta. W **rozdziale czwartym** zatytułowanym „Metoda sterowania zapasami w warunkach niepewności z wykorzystaniem dedykowanych technik sztucznej inteligencji” (41 str.) Autor rozprawy podjął próbę



opracowania metodyki rozwiązywania problemu sterowania zapasami towarów w warunkach niepewności z wykorzystaniem wybranych metod i modeli sztucznej inteligencji: sztucznych sieci neuronowych, logiki rozmytej oraz algorytmów genetycznych. Jak podaje Doktorant celem proponowanej metodyki jest „...znalezienie takiego harmonogramu dostaw w rozważanym horyzoncie czasu dla wybranego ogniwa, który minimalizuje poziom zapasów, liczbę potencjalnych braków w zapasie oraz liczbę wykonywanych dostaw.” Rozdział rozpoczyna się od krytycznej analizy literatury przedmiotu dotyczącej sterowania zapasami towarów z uwzględnieniem oddziaływania czynników niepewnych i stanowi solidny wstęp do zaproponowanych przez mgra inż. Pawła Więcka metodyki i modeli. Mimo, że tematyka ta jest podejmowana przez wielu badaczy, Autor rozprawy zauważył pewne luki badawcze, które starał się wypełnić w proponowanej metodyce. W podrozdziale 4.2 sformułowano założenia dla problemu sterowania zapasami w warunkach niepewności, a następnie zaprezentowano architekturę rozwiązania problemu (przedstawioną na rys. 18 na str. 62 rozprawy). Głównymi elementami składowymi zaproponowanego modelu są moduł predykcji popytu oraz blok wnioskowania rozmytego wzbogacony o algorytm genetyczny. W pierwszym z nich Doktorant umiejętnie połączył modele analizy spektralnej z modelami autoregresyjnymi ARIMA i sztucznymi sieciami neuronowymi. Takie hybrydowe podejście wykorzystano do identyfikacji i predykcji przyszłego zapotrzebowania na towar. Na uwagę zasługuje zaproponowana przez Autora iteracyjna procedura doboru struktury sieci neuronowej. Zadaniem drugiego modułu jest wyznaczanie optymalnych wartości parametrów sterowania na podstawie zoptymalizowanej przez algorytm genetyczny bazy wiedzy reprezentowanej przez zbiór reguł rozmytych. W podrozdziale 4.3 przedstawiono ogólny model matematyczny dla problemu optymalnego sterowania zapasami z uwzględnieniem niepewności. Autor sformułował trzy kryteria optymalizacji, dla których określił zbiór ograniczeń, a także wyznaczył parametry niepewne dla rozważanego problemu wraz z przedziałami niepewności. Uściślenia wymaga sformułowany na str. 89 wielokryterialny problem optymalizacji. Tą część pracy kończy podrozdział 4.4 pt. „Problem sterowania zapasami towarów w ujęciu systemowym”. Moim zdaniem podrozdział ten powinien znaleźć się na początku rozdziału czwartego, gdyż zawiera pewne ogólne, wykorzystujące podejście systemowe, przesłanki stosowania zaproponowanych rozwiązań w ramach zintegrowanego, hierarchicznego systemu logistycznego.

W **rozdziale piątym** zatytułowanym „Weryfikacja efektywności proponowanej metody sterowania zapasami towarów w warunkach niepewności” (43 str.) Autor dysertacji dokonał weryfikacji zaprezentowanych w poprzednim rozdziale modeli. Do badań symulacyjnych Doktorant wykorzystał 25 zestawów danych rzeczywistych z przedsiębiorstwa zajmującego się dystrybucją produktów płynnych. Podstawowe dane stanowiły szeregi czasowe przedstawiające dzienny popyt na dany produkt i obejmowały okres dwóch lat.

Badania weryfikacyjne i symulacyjne obejmowały m. in.:

- estymację parametrów składowej spektralnej oraz modelu ARIMA w hybrydowym modelu predykcji;
- ocenę efektywności procesu uczenia sieci neuronowej;
- weryfikację trafności otrzymanych prognoz zapotrzebowania na towary z uwzględnieniem różnych horyzontów czasowych;

- ocenę wielokryterialnej optymalizacji bazy reguł rozmytych z zastosowaniem algorytmu genetycznego

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych porównano z podstawowymi metodami sterowania zapasami dostępnymi w literaturze oraz przeprowadzono analizę wrażliwości modelu na zmiany jego wybranych parametrów.

Należy zwrócić uwagę na bogaty materiał ilustracyjny oraz tabelaryczny tej części pracy, ułatwiający czytelnikowi interpretację wyników i zrozumienie omawianych problemów.

W ostatnim, **szóstym rozdziale** (5 str.) Autor dysertacji odniósł się do zakresu przeprowadzonych prac oraz zaprezentował wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych rezultatów. Doktorant w podsumowaniu stwierdził m.in. że „...zweryfikowano, iż proponowane podejście posiada cechę uniwersalności, dzięki czemu może być użyteczne w różnych przedsiębiorstwach dla różnej charakterystyki produktów oraz różnych wzorcach zapotrzebowania”. Mimo, iż faktycznie zaproponowane rozwiązanie problemu ma pewne cechy uniwersalności, nie zauważyłem w rozprawie miejsca, w którym byłoby to zweryfikowane. Wskazując praktyczne aspekty proponowanego podejścia, mgr inż. Paweł Więcek przekonuje, że „... zaproponowana w pracy predykcyjna metoda sterowania, ujęta w ramy systemowe oferuje i warunkuje wiele istotnych nowych specyfikacji rozwiązywanego problemu tzn. uniwersalność, elastyczność, eksploracja nowoczesnych inteligentnych narzędzi systemowych”. Autor podsumowując teoretyczne i empiryczne rezultaty rozprawy nie ograniczył się wyłącznie do zestawienia wniosków o ogólnym charakterze, ale wskazał także kierunki dalszych badań w zakresie sterowania zapasami, m.in.:

- rozszerzenie proponowanej metody na zagadnienie wieloszczeblowe, obejmujące większą liczbę podmiotów w sieci dostaw,
- uwzględnienie w metodzie dodatkowych ograniczeń i parametrów, np.: czasu składowania towarów, zmienności cen zakupu, rabatów u dostawców itp.

#### 4. Spostrzeżenia i uwagi krytyczne

Pomimo wszystkich zalet i pozytywnej oceny rozprawy pod względem zawartości merytorycznej, podczas lektury pracy zauważyłem pewne jej niedostatki i usterki. Nasunęły się także pewne spostrzeżenia i pytania, na które chciałbym, aby Doktorant udzielił odpowiedzi podczas publicznej obrony.

##### Pytania i spostrzeżenia ogólne

- 1) Odnosząc się do sformułowanych wniosków rozprawy prosiłbym o uzasadnienie stwierdzenia, w którym określa Pan zbudowany model jako narzędzie uniwersalne, mogące być użyteczne w różnych przedsiębiorstwach, dla różnej charakterystyki produktów oraz dla różnych wzorców popytu. Czy w ramach badań sprawdzał Pan zachowanie modeli dla innych szeregów czasowych z innych przedsiębiorstw?
- 2) Czy dla stosowanych w budowie hybrydowego modelu predykcji sztucznych sieci neuronowych rozważane były inne, poza stosowaną w pracy architektury sieci?



- 3) W jaki sposób dobierano podstawowe parametry sieci i ich uczenia takie jak funkcje aktywacji, liczba epok oraz czy przeprowadzono tzw. preprocessing danych?
- 4) W module sterowania zastosowano system wnioskowania rozmytego bazujący na modelu Mamdaniego, a do optymalizacji wag zastosowano algorytm genetyczny. Prosiłbym o uzasadnienie wyboru takiego algorytmu. Czy rozważał Pan zastosowanie lub testował inne algorytmy do optymalizacji wag. Jaka była efektywność czasowa zastosowanego algorytmu?

### Uwagi szczegółowe

- 1) W pracy zauważono liczne usterki interpunkcyjne, stylistyczne i edytorskie, nie mają one większego wpływu na jej ocenę merytoryczną.
- 2) Duża część oznaczeń stosowanych w pracy nie została zamieszczona w wykazie oznaczeń.
- 3) Na str. 28, w formule (8) zauważono brak strzałki.
- 4) Autor często niepoprawnie używa określenia dedykowany, np. dedykowanych technik, dedykowanych metod i narzędzi, itp.
- 5) Na rysunku 23 (str. 78) pokazującym strukturę modułu wnioskowania rozmytego brakuje piątego wejścia (aktualny popyt) opisanego w tekście i na schemacie z rys. 18 (str. 62).
- 6) Na str. 92 niepoprawny opis źródła rysunku 33 – powinno być ”opracowanie własne na podstawie [3, 4].
- 7) W bibliografii załącznikowej w pozycji [42] (str. 146) zamiast Duziński powinno być Dudziński
- 8) Na str. 54, w. 3d powołanie na niewłaściwą pozycję literaturową.
- 9) Na str. 139 Autor pisze: „... Dodatkowo w pracy przedstawiono koncepcję **ujęcia** rozważanej problematyki sterowania zapasami w **ujęciu** systemowym na podstawie idei hierarchicznej struktury Inteligentnych Systemów Logistycznych (ILS)...”. Moim zdaniem należy przereklamować to zdanie.

## 5. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego. Za oryginalny wkład Doktoranta należy uznać opracowanie autorskiej metody predykcyjnego sterowania zapasami w warunkach niepewności z łącznym wykorzystaniem metod prognozowania szeregów czasowych i metod sztucznej inteligencji, oraz weryfikację zaproponowanej metody na danych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy uważam, iż mgr inż. Paweł Więcek porusza się z dużą swobodą w badanej tematyce, wykazuje umiejętność samodzielnego zdefiniowania problemu naukowego i prowadzenia badań, interpretacji i uzasadnienia wyników

oraz weryfikowania hipotez na podstawie przyjętych założeń. Zaprezentowane w części empirycznej rozprawy rozważania potwierdziły wysoką dojrzałość naukową Doktoranta, który wykazał, że jest w stanie prowadzić prace badawcze, potrafi w sposób krytyczny dokonać przeglądu literatury, posiada umiejętność zastosowania odpowiednich narzędzi i programów komputerowych do analiz i weryfikacji wyników badań, oraz potrafi wyciągać właściwe wnioski z przeprowadzonych badań. Uważam, że przyjęte tezy rozprawy zostały pozytywnie zweryfikowane, a wyznaczone cele pracy mające charakter naukowy zostały konsekwentnie zrealizowane.

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa, mimo przedstawionych w poprzednich częściach recenzji uwag krytycznych, które nie podważają zasadniczego dorobku Doktoranta, została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Przyjęte, przez mgr inż. Pawła Więcka, tezy rozprawy zostały udowodnione, a wyznaczone cele konsekwentnie osiągnięte. Chciałbym jeszcze raz podkreślić, że przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego z wdrażaniem nowych metod i modeli sterowania zapasami.

Do zasadniczych osiągnięć Doktoranta w recenzowanej pracy zaliczam:

- 1) prawidłowe sformułowanie oryginalnego tematu rozprawy oraz kompetentne osadzenie go w ramach literatury przedmiotu;
- 2) systemowe ujęcie problematyki sterowania zapasami w ramach zintegrowanego, hierarchicznego systemu logistycznego (ILS);
- 3) opracowanie autorskiej metody predykcyjnego sterowania zapasami w warunkach niepewności z łącznym wykorzystaniem metod prognozowania szeregów czasowych i metod sztucznej inteligencji;
- 4) weryfikacja i ocena wyników analiz z zastosowaniem symulacji komputerowej.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam jednoznacznie, że rozprawa doktorska **mgr inż. Pawła Więcka** nt.: *Zastosowanie narzędzi sztucznej inteligencji w sterowaniu zapasami towarów w warunkach niepewności* **spełnia wymagania Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym** (Dz. U. Nr 0365595 z 16.04.2003 r. Art. 16, pkt. 2, ust. 1) wraz z późniejszymi zmianami i Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r.

**Wnioskuje o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji jako rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Więcka na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Transport i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Marek Karkula, prof. AGH

