

Politechnika Łódzka  
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej  
ul. Wólczańska 215  
93-005 Łódź

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Chołodowicz, pt.**

**„Sterowanie procesem dystrybucji produktów o zróżnicowanej trwałości w warunkach zmiennego popytu i opóźnień dostaw z uwzględnieniem niepewności układu oraz wykorzystaniem metod optymalizacji jedno- i wielokryterialnej”**

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr. hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT, z dnia 24 czerwca 2024 r.

### 1. Cel i zakres rozprawy, teza

Przedmiotem rozprawy jest optymalizacja systemów dystrybucji dóbr rozpatrywanych jako klasa układów dynamicznych obciążonych niepewnością. W odróżnieniu od klasycznego podejścia właściwego domenie badań operacyjnych, dla podniesienia jakości procesu dystrybucji Autorka proponuje zastosowanie metod teorii sterowania oraz inteligencji obliczeniowej. W świetle obserwowanego w ostatnich latach zwiększonego poziomu zakłóceń w rozważanej klasie układów, związanych między innymi z szybko zmiennym popytem, blokowaniem kanałów przesyłowych, czy sankcjami politycznymi lub administracyjnymi, tego rodzaju podejście może przynieść lepsze rezultaty niż typowo rozważana analiza stochastyczna prowadzona w dłuższym horyzoncie czasu. Tematyka rozprawy jest zatem wysoce aktualna i ważna nie tylko z naukowego, ale przede wszystkim praktycznego punktu widzenia. A co za tym idzie cel główny rozprawy oraz pięć celów szczegółowych obejmujących budowanie modeli matematycznych i symulacyjnych, implementację istniejących algorytmów oraz projektowanie nowych są jak najbardziej zasadne. Opracowane przez Autorkę nowe metody i rozwiązania algorytmiczne mogą pomóc w stabilizacji łańcuchów dostaw oraz kształtowaniu trwałego rozwoju ekonomicznego uzależnionego od sprawnie funkcjonującego systemu relokacji dóbr.

**Teza rozprawy**, sformułowana jako:

„Zastosowanie dyskretnych modeli dynamicznych wraz z metodami sterowania, wspieranych przez nowoczesne techniki optymalizacji jedno- i wielokryterialnej oraz metody sztucznej inteligencji, umożliwi poprawę jakości sterowania zamówieniami w systemach dystrybucji, szczególnie w warunkach niepewności związanych z opóźnieniami dostaw i zmiennego zapotrzebowania rynkowego.”;

w sposób adekwatny odpowiada bieżącym wyzwaniom badawczym w rozważanej klasie problemów.

## 2. Zawartość rozprawy

Podstawą osiągnięcia zgłaszanego do oceny w ramach rozprawy doktorskiej stanowi cykl tematycznie powiązanych publikacji naukowych. W skład cyklu wchodzi **12 prac** opublikowanych w recenzowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych, indeksowanych na liście Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW). Sześć periodyków posiada współczynnik *Impact Factor* (IF). Cykl obejmuje następujące pozycje:

- [1] Chołodowicz E., Orłowski P.: Dynamiczny dyskretny model systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem. *Logistyka*, Tom: 4, Strony: 28-32, 2015.
- [2] Chołodowicz E., Orłowski P.: Sterowanie przepływem towarów w magazynie z wykorzystaniem predyktora Smitha. *Pomiary Automatyka Robotyka*, Tom: 19, Zeszyt: 3, Strony: 55-60, 2015.
- [3] Chołodowicz E., Orłowski P.: A periodic inventory control system with adaptive reference stock level for long supply delay. *Measurement Automation Monitoring*, Tom: 61, Zeszyt: 12, Strony: 568-572, 2015.
- [4] Chołodowicz E., Orłowski P.: Comparison of a perpetual and PD inventory control system with Smith predictor and different shipping delays using bicriterial optimization and SPEA2, *Pomiary Automatyka Robotyka*, Tom: 20, Zeszyt: 3, Strony: 5-12, 2016.
- [5] Chołodowicz E., Orłowski P.: Porównanie systemów sterowania zapasami ze zmiennym opóźnieniem dostaw i zaburzonym zapotrzebowaniem: cyklicznego oraz z regulatorem PD i predyktorem Smitha, *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, Tom: XVII, Zeszyt: 12, Strony: 67-90, 2016.
- [6] Chołodowicz E., Orłowski P.: Comparison of SPEA2 and NSGA-II Applied to Automatic Inventory Control System Using Hypervolume Indicator, *Studies in Informatics and Control*, Tom: 26, Zeszyt: 1, Strony: 67-74, 2017.
- [7] Chołodowicz E., Orłowski P.: Impact of Control System Structure and Performance of Inventory Goods Flow System with Long-Variable Delay, *Elektronika Ii Elektrotechnika*, Tom: 24, Zeszyt: 1, Strony: 11-16, 2018.

- [8] Chołodowicz E., Orłowski P.: Development of new hybrid discrete-time perishable inventory model based on Weibull distribution with time-varying demand using system dynamics approach, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 154, 2021, 107151.
- [9] Chołodowicz E., Orłowski P.: Control of perishable inventory system with uncertain perishability process using neural networks and robust multicriteria optimization. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 70, No. 3, 2022.
- [10] Chołodowicz, E., Orłowski, P.: Robust Control of Perishable Inventory with Uncertain Lead Time Using Neural Networks and Genetic Algorithm. In: Groen D., de Mulatier C., Paszynski M., Krzhizhanovskaya V.V., Dongarra J.J., Sloot P.M.A. (Eds.) *Computational Science - ICCS 2022*. ICCS 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol. 13350. Springer, Cham.
- [11] Chołodowicz E., Orłowski P.: Switching robust neural network control of perishable inventory with fixed shelf life products under time-varying uncertain demand, *Journal of Computational Science*, 2023, 102035.
- [12] Chołodowicz E., Orłowski P.: Neural Network Control of Perishable Inventory with Fixed Shelf Life Products and Fuzzy Order Refinement under Time Varying Uncertain Demand. *Energies*. 2024; 17(4): 849.

Sumaryczny IF pozycji cyklu: **17,304**.

Łączna liczba punktów MNiSW: **698**.

Żadna z prac nie ma innych autorów poza Doktorantką i jej opiekunem naukowym. Mgr inż. Chołodowicz jest pierwszą autorką wszystkich wymienionych prac z szacowanym indywidualnym wkładem w powstanie publikacji 50%.

Oprócz tego w dorobku naukowym Doktorantki jest sześć publikacji z dziedziny automatyki i robotyki nieujętych w cyklu, w tym trzy referaty na znaczącej międzynarodowej konferencji naukowej International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), edycja 2020 i 2022, wartościowanej 140 punktami MNiSW.

Łączna liczba cytowań (bez autocytowań) prac Doktorantki według restrykcyjnej bazy Web of Science wynosi 31 a bazy Scopus 47. Indeks Hirscha według tych baz (z pominięciem autocytowań) wynosi 4.

### 3. Analiza przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników

W pracy [1] zaprezentowano dyskretny model dynamiki systemu produkcyjno-magazynowego, na który nałożono podlegający przypadkowym zmianom popyt zewnętrzny. Nowością modelu w stosunku do dotychczas proponowanych podobnych koncepcji opisu dynamiki rozważanej klasy układów jest bezpośrednio uwzględnienie zmienności opóźnienia

w realizacji zamówień/dostaw. Inaczej niż w większości minionych prac poświęconych temu zagadnieniu fluktuacje opóźnienia nie są opisywane bezpośrednio, ale za pośrednictwem binarnej funkcji odzwierciedlającej zdarzenie wysyłki (lub jej brak). Poprawność modelu matematycznego zweryfikowano symulacyjnie przy pomocy programu komputerowego stworzonego w środowisku Matlab/Simulink. W artykule [2] przedstawiono rozwinięcie proponowanej koncepcji na przypadek obsługi procesu uzupełniania zasobów nietrwałych, ulegających degradacji zgodnie z rozkładem Weibulla. Rozpatrzono dwie polityki szeregowania odpowiedzi na popyt, tj. wydawanie z magazynu pierwszej lub ostatniej odebranej partii produktów, odpowiednio FIFO i LIFO, a także graniczną wartość okresu użyteczności. Poprawność modelu zweryfikowano symulacyjnie, tym razem posiłkując się rzeczywistymi danymi o procesie mikrobiologicznego psucia się owoców przechowywanych w różnych temperaturach. Ocenie poddano także efektywność klasycznego elementu kompensacji opóźnienia – predyktora Smitha – w jego dyskretnej postaci. Dokładny opis modelu i wielopłaszczyznowe badania numeryczne w kilku realistycznych scenariuszach testowych przeprowadzono w artykule [8].

Model z artykułu [1] wykorzystano w pracy [3] do badania właściwości klasycznej metody zarządzania procesem uzupełniania zasobów – Re-Order Cycle – rozszerzonej o możliwość adaptacyjnego dostosowywania maksymalnego poziomu zapasów do zgłaszanego zapotrzebowania. W kolejnych artykułach: [4], [5] i [7], dokonano analizy porównawczej tej metody oraz regulatora PD i predyktora Smitha, stosując ekonomiczne kryteria jakościowe odzwierciedlające stopień odpowiedzi na zapotrzebowanie rynkowe i koszt utrzymywania zapasów. Nastawy układów regulacji zostały wyznaczone numerycznie za pomocą algorytmu ewolucyjnego Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2). Szerszą dyskusję nad wyborem metody obliczeniowej w rozpatrywanych zadaniach optymalizacji przeprowadzono w pracy [6], gdzie SPEA2 zestawiono z algorytmem genetycznym przeznaczonym dla optymalizacji wielokryterialnej Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II).

Ostatnie cztery prace cyklu [9]–[12] poświęcone zostały zagadnieniu projektowania i oceny efektywności algorytmów sterowania w systemach logistycznych z nietrwałymi zasobami. W modelu zastosowanym w artykule [9] czas realizacji zamówienia jest stały i z góry znany, natomiast produkty ulegają degradacji według procesu Weibulla. Popyt podlega przypadkowym wahaniom w znanym projektantowi układzie regulacji zakresie. Dla rozwiązania zadania sterowania rozważono regulator oparty na sieci neuronowej, którego nastawy ustalane są w procesie uczenia się dla różnych funkcji popytu na drodze optymalizacji wielokryterialnej. Pokazano przewagę przyjętej metody nad podejściem nieuwzględniającym niepewności nietrwałości produktów. W pracy [10] rozważono podobny problem projektowy, ale dla przypadku niepewnego czasu realizacji zamówień. Przy doborze nastaw regulatora, strojeniu wag sieci neuronowej, wykorzystano algorytm genetyczny. Pokazano, że mimo znaczącej niepewności możliwe jest uzyskanie odpowiedzi układu pozbawionej przeregulowań i oscylacji. Ścieżka rozumowania przedstawiona w pracach [9] i [10] kontynuowana jest w artykule [11], gdzie oprócz niepewności związanej z czasem

realizacji dostaw i nietrwałości produktów na etapie projektowania układu regulacji uwzględniono też niepewność popytu. Proponowany regulator wyposażono w mechanizm przełączania umożliwiający adaptacyjną zmianę wag sieci neuronowej bez potrzeby prowadzenia zasobochłonnych obliczeń. Sygnałem bazowym w procesie dopasowania wag jest stosunek ruchomej odchylenia standardowego do ruchomej średniej wartości popytu – parametr często rozważany w literaturze przedmiotu przy badaniu podatności sieci logistycznych i polityk zarządzania zasobami na formowanie się efektu byczego bicza. W pracy [12] rozważono połączenie sieci neuronowych i logiki rozmytej do rozwiązania problemu zarządzania nietrwałymi zapasami w warunkach niepewnego popytu. Przy wyznaczeniu sygnału zamówienia sieć neuronowa pełni rolę regulatora podstawowego, a rozmyty estymator elementu korygującego ustalanych wielkości na podstawie prognozy fluktuacji popytu. Zaprojektowany schemat regulacji porównano z wcześniejszą propozycją z pracy [11] oraz klasyczną polityką uzupełniania zasobów stosowaną w przypadku znaczących zmian popytu – zmów-do-poziomu z elementem proporcjonalności. W większości rozpatrywanych scenariuszy uzyskano poprawę funkcjonowania systemu logistycznego i obniżenie kosztów.

#### 4. Ocena rozprawy

Przedmiot rozprawy odpowiada wyzwaniom naukowym i ekonomicznym podnoszonym w dyskusjach o tworzeniu nowoczesnych systemów dystrybucji dóbr. Autorka dobrze orientuje się w bieżącym stanie wiedzy i głównych trendach. Na uwagę zasługuje skrupulatne podejście do badania zjawisk zachodzących w rozważanej klasie układów uwzględniające interakcje między uczestnikami wymiany dóbr, jakie mają miejsce w rzeczywistych łańcuchach dostaw oraz niedoskonałości kanałów transportowych. Dlatego też zbudowane modele umożliwiają analizę stosunkowo szerokiego spektrum praktycznych problemów i właściwości układu regulacji. W rozprawie zbadano między wpływ ograniczonego czasu użyteczności towarów w procesie sprzedaży, podlegający losowym wahaniom popyt oraz zmienne w czasie opóźnienie. Ponadto warstwowo-modułowa struktura modelu pozwala na badanie różnych strategii sterowania procesem uzupełniania zasobów i polityk wydawania towarów z magazynu w odpowiedzi na różne funkcje popytu. Dzięki temu może on być stosowany do celów prognozowania, optymalizacji oraz regulacji automatycznej. W przeciwieństwie do typowego podejścia bazującego na analizie stochastycznej zastosowanie metod teorii sterowania i inteligencji obliczeniowej przy projektowaniu algorytmów zarządzania przepływem towarów pozwoliło na uzyskanie lepszych jakościowo wyników niż klasyczne metody z domeny badań operacyjnych i redukcję kosztów.

Podsumowując, rozprawa zawiera oryginalne, wartościowe wyniki, poszerzające wiedzę w dziedzinie automatyki i informatyki i należy ją ocenić zdecydowanie pozytywnie. Rezultaty badań zawarto w kilku liczących się publikacjach, między innymi sześciu artykułach w pismach z tzw. listy filadelfijskiej, w tym periodykach z wysokim współczynnikiem wpływu

*Computers & Industrial Engineering* (IF = 7,9), *Journal of Computational Science* (IF = 3,3), *Energies* (IF = 3,2) oraz referatów prezentowanych na prestiżowych międzynarodowych konferencjach. Godna uwagi jest również rosnąca jakość wywołu naukowego prezentowanego w kolejnych publikacjach, co świadczy o rozwoju kompetencji badawczych, przede wszystkim umiejętności rozpoznania istotnych wyzwań i wyboru właściwej metody ich rozwiązywania, oraz konsekwencji w dążeniu do obranego celu.

## 5. Uwagi

Zawartość rozprawy odpowiada zakresem tezie, a przeprowadzone i udokumentowane w składających się na cykl publikacjach badania pozwalają wnioskować o jej prawdziwości. Podczas lektury prac i tekstu rozprawy nasunęło się jednak kilka uwag i spostrzeżeń, które być może warto uwzględnić w dalszych pracach:

1. Rozpatrywane układy i tworzone modele uwzględniają tylko jeden kanał relokacji zasobów. Tymczasem w rzeczywistych systemach logistycznych często mamy do czynienia z wieloma kanałami i trybami transportowymi, tzw. systemy wielomodowe, oraz z sytuacją, gdy zasoby pozyskiwane są od kilku dostawców i przekazywane do kilku punktów docelowych. Jakie są perspektywy rozszerzenia zaprezentowanych modeli i analiz na przypadek układu sieciowego?
2. Weryfikacja poprawności modeli i zaprojektowanych algorytmów odbywa się na drodze numerycznych symulacji. Czy skonstruowany aparat matematyczny można wykorzystać do formalnego badania właściwości rozważanych układów, na przykład do analitycznego wykazania stabilności?
3. Często podnoszonym argumentem motywującym do stosowania osiągnięć teorii sterowania w systemach logistycznych jest uzyskanie zbilansowanej reakcji na wahania warunków rynkowych – podejście reaktywne – w miejsce typowo stosowanego podejścia prognostycznego (proaktywnego). Innymi słowy, w odróżnieniu od klasycznej ścieżki badań operacyjnych, w warunkach znacznej niepewności, być może lepiej jest reagować na zmiany zachodzące w układzie i otoczeniu biznesowym, niż bazować na prognozach pochodzących z analizy stochastycznej. Tymczasem zastosowanie sieci neuronowych, dopasowanych w procesie uczenia do konkretnych scenariuszy rynkowych, obniża wartość podejścia reaktywnego, gdy rzeczywiste warunki odbiegają od prognoz płynących z danych treningowych. Zastanawiam się jak wyglądałaby odpowiedź układu i jakie byłyby parametry jakościowe, gdyby regulator z siecią neuronową nauczoną dla popytu opisanego na przykład rozkładem normalnym zastosować do układu z popytem zmieniającym się skokowo (sezonowym), w porównaniu z innymi schematami, na przykład regulatorem PD z predyktorem Smitha?

## 6. Wniosek końcowy

Uważam, że zakres przeprowadzonych badań i przedstawiona do oceny rozprawa mgr inż. Eweliny Chołodowicz spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i tym samym rekomenduję dopuszczenie jej do publicznej obrony. Z uwagi na ponadprzeciętny dorobek publikacyjny proponuję również wyróżnienie przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego stosowną nagrodą.

*P. Ignaciuk*

dr hab. inż. Przemysław Ignaciuk

