

# Sterowanie przepływem towarów w magazynie z wykorzystaniem predyktora Smitha

Ewelina Chołodowicz, Przemysław Orłowski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313, Szczecin

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki analizy literaturowej zagadnień związanych ze sterowaniem przepływem materiałów w systemach magazynowych. Na podstawie zaproponowanego dyskretnego, niestacjonarnego, dynamicznego modelu systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem stworzono układ sterowania. Przedstawiona koncepcja usprawnienia przepływu towarów wykorzystuje predyktor Smitha z regulatorem PID. Do doboru optymalnych nastaw parametrów układu regulacji zastosowany został algorytm genetyczny. Wskaźnik jakości skonstruowano na bazie: kosztów tworzenia i utrzymania zapasów oraz utraconych zysków, tj. różnic między zapotrzebowaniem a sprzedażą produktów. Wskaźnik ten odzwierciedla, jak system sterowania zamówieniami nadąża za zmieniającymi się potrzebami rynku. Problem ten jest istotny w przedsiębiorstwach produkcyjnych i handlowych, które dążą do minimalizacji czasu realizacji operacji magazynowych i maksymalizacji przepustowości magazynu przy zapewnieniu ciągłości procesu produkcyjnego i sprzedaży. Sformułowano opis matematyczny systemu sterowania oraz problemu optymalizacji. Dokonano jego implementacji stosując algorytm genetyczny. Przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych ukazujące jakość zaproponowanego układu regulacji w środowisku MATLAB/Simulink.

**Słowa kluczowe:** układ niestacjonarny, matematyczny model magazynu, systemy dyskretne, układ sterowania, predyktor Smitha, regulator PID

## 1. Wprowadzenie

U podstaw rozwoju metod i technik zarządzania produkcją znajduje się potrzeba poprawy jakości oraz głównie rynek charakteryzujący się dużą konkurencyjnością. Wywierana jest presja na przedsiębiorstwa, które poprzez podnoszenie jakości produktów starają się zwiększyć swoją atrakcyjność.

Zjawisko występowania przestoju w systemach magazynowych jest związane zarówno z czynnikami losowymi, takimi jak błędy pracowników, wypadki, katastrofy, kradzieże oraz wszelkiego rodzaju zakłócenia, jak i przede wszystkim z poziomem zastosowanej technologii.

Jedną z głównych metod pozwalających na zminimalizowanie strat jest dobór odpowiedniej polityki zarządzania zapasami. Współczesny magazyn jest bowiem postrzegany jako miejsce optymalizacji poziomu zapasów, skracania cykli realizacji zamówień, kształtowania poziomu obsługi klienta, a przez to obniżania kosztów logistycznych. Głównym powodem tworzenia zapasów jest konieczność wyrównywania różnych intensywności

strumieni przepływów [1]. Priorytetem jest zapewnienie odpowiedniego poziomu obsługi klientów z uwzględnieniem jakości i stosunku do całości zrealizowanych zamówień.

W krajach wysoko uprzemysłowionych główny kierunek rozwoju przemysłu to racjonalizacja przepływu materiałów, graniczna minimalizacja zapasów oraz redukcja cykli produkcyjnych [2]. W licznej grupie czołowych japońskich firm proces produkcyjny prowadzony jest przy niemal zerowym stanie zapasów [3].

Znaczna część kosztów logistycznych (przeważnie od 20 % do 30 %) jest generowana przez utrzymywane zapasy [4]. Znalezienie optymalnej wielkości poziomu zapasu, która uwzględni procesy zakupów (produkcji) i sprzedaży stanowi warunek dla skutecznego i efektywnego zarządzania zapasami [4]. Koordynacja tych procesów w logistycznym łańcuchu dostaw pozwala przedsiębiorstwu osiągnąć sukces na rynku.

W sterowaniu zapasami należy również uwzględniać także koszt braku (wyczerpania) zapasu [5]. W koszt ten wchodzi: koszty pośrednie – związane z możliwością przejścia klientów przez konkurencję (pogorszenie się wizerunku firmy) oraz koszty bezpośrednie – utrata marży handlowej na skutek braku towaru [1].

Trudno jest uzyskać zadowalające efekty związane z układem sterowania w systemach z opóźnieniem, co stanowi fundamentalny problem w wielu procesach regulacji. Z kolei magazyn umożliwia skracanie czasu upływającego między otrzymaniem zamówienia od klienta, a realizacją dostawy [2].

Podejście Rosenblatt i Rolla [6] optymalizuje trzy rodzaje kosztów: koszty związane z początkową inwestycją – budową

### Autor korespondujący:

Ewelina Chołodowicz, cholodowicz.ewelina@gmail.com

### Artykuł recenzowany

nadesłany 5.07.2015 r., przyjęty do druku 6.08.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

i konserwacją, koszty niedoboru towarów i przestoju oraz koszty związane z polityką przechowywania proporcjonalne do reguły do zajmowanego miejsca w magazynie.

Powyższe przykłady wskazują na to, że rozwiązania zmagające do minimalizacji kapitału, kosztów, a w efekcie do maksymalizacji zysku są zagadnieniem istotnym i potrzebnym.

Pojawia się coraz więcej metod usprawnienia przepływu materiałów w systemie magazynowym, które wykorzystują z kolei coraz to bardziej zaawansowane techniki sterowania [7–10].

W pracy [7] rozważany jest liniowy stacjonarny układ dyskretny ze stałym opóźnieniem do skutecznej kontroli systemów magazynowych z towarami łatwo psującymi się, z wykorzystaniem metod opartych na sterowaniu ślizgowym. W pracy [8] wykorzystano sterowanie liniowo-kwadratowe w celu wyeliminowania zagrożenia tzw. efektu byczego bicia (ang. *bullwhip effect*).

W przypadku obiektów uwarunkowanych niepewnością do sterowania systemami magazynowym sprawdzają się metody sztucznej inteligencji – w pracy [11] zastosowano logikę rozmytą do usprawnienia przepływu materiałów w magazynie.

Układy regulacji dla obiektów z opóźnieniem bazujące na koncepcji predyktora Smitha, mają szerokie zastosowanie nie tylko w procesach przemysłowych [12]. Do analizy i modelowania przepływu dóbr w systemie magazynowym można wykorzystać wybrane rezultaty z prac związanych z problematyką powstawania zatorów i blokad komunikacyjnych w sieciach komputerowych o zmiennych w czasie parametrach [13–17].

W niniejszej pracy zaproponowano układ sterowania dla systemu magazynowego polegający na adaptacji predyktora Smitha dla układu niestacjonarnego z ograniczeniami sygnałów oraz z optymalizacją parametrów układu z wykorzystaniem algorytmu genetycznego.

## 2. Model matematyczny

Model matematyczny systemu magazynowego wraz ze szczegółowym opisem został podany w pracy [18]. Poniżej podano najważniejsze informacje.

Liczba produktów, które potencjalnie mogą być sprzedane z magazynu jest modelowana jako pewna, nieznaną z góry ograniczona funkcja czasu:  $0 \leq d(k) \leq d_{\max}$ . Chwilowe wartości  $d(k)$  podlegają wahaniom w czasie i zależą od zapotrzebowania na rynku. Zapotrzebowanie na produkty jest w ogólności zmienne w czasie. Liczba produktów wysłanych z magazynu  $h(k)$  jest zależna od zapotrzebowania jak i od dostępnych zapasów magazynowych  $y(k)$  i spełnione są następujące nierówności:

$$0 \leq h(k) \leq d(k) \leq d_{\max}, 0 \leq y(k) \leq y_{\max} \quad (1)$$

Jeżeli liczba produktów w magazynie jest wystarczająco duża  $y(k) \geq d(k)$ , wówczas w chwili  $k$  zachodzi  $d(k) = h(k)$ .

Z punktu widzenia sterowania przepływem towaru istotne jest utrzymanie określonych zapasów w magazynie niezależnie od chwilowych zmian zapotrzebowania klientów, tak aby nie doszło do sytuacji, w której magazyn będzie pusty, bądź liczba przechowywanych produktów będzie nadmierna bądź wręcz przekraczająca pojemność magazynu  $y_{\max}$ . W celu uwzględnienia w modelu zmiennego w czasie opóźnienia związanego z kumulacją produktów w oczekiwaniu na transport wprowadzono współczynnik wysyłki produktów do magazynu w chwili  $k$ , określony w następujący sposób:

$$q(k) = \begin{cases} 0 & \text{– wysyłka} \\ 1 & \text{– oczekiwanie na transport} \end{cases} \quad (2)$$

Liczba produktów oczekujących na wysyłkę do magazynu w chwili  $k$ , jest zależna od wielkości zamówień  $u(k)$  określona następującą zależnością:

$$x(k) = q(k-1)x(k-1) + u(k - \tau_p) \quad (3)$$

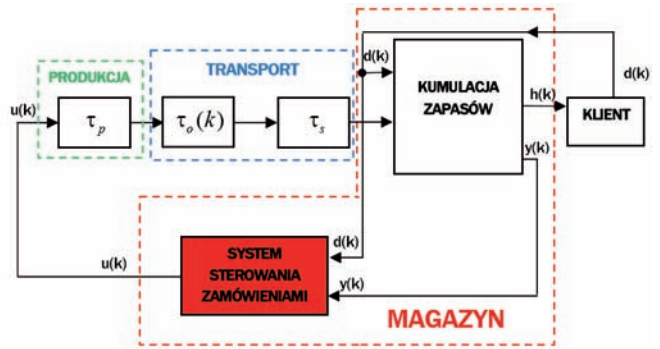
Liczba produktów zgromadzonych w magazynie w chwili  $k$ , zwana stanem magazynu, będzie zatem dana zależnością:

$$y(k) = y(k-1) + [1 - q(k - \tau_s)]x(k - \tau_s) - h(k) \quad (4)$$

gdzie:  $x(k) \geq 0$ ,  $u(k) \geq 0$ ,

$\tau_p$  – opóźnienie produkcyjne – związane z czasem potrzebnym na wyprodukowanie bądź skompletowanie zamówienia,

$\tau_s$  – opóźnienie spedycyjne – interwał czasu niezbędny na przetransportowanie zamówionych produktów do magazynu bez czasu oczekiwania na transport.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu magazynowego ze sterowaniem  
Fig. 1. Block diagram of inventory system with control

Przy założeniu, że znane są opóźnienia  $\tau_p$ ,  $\tau_s$  oraz funkcja  $q(k)$  dla  $k \in N$ , powyższy model jest liniowym, niestacjonarnym, dyskretnym modelem układu dynamicznego, dla którego można stosować metody podane m.in. w pracach [19–22] z zastrzeżeniem danych ograniczeń. Schemat blokowy analizowanego systemu został przedstawiony na rys. 1. Układ składa się z trzech głównych bloków: produkcji, transportu i magazynu. Opóźnienie zależne od czasu  $\tau_o(k)$  związane jest z oczekiwaniem na środek transportu oraz z kumulacją zamówień.

## 3. Układ sterowania

W klasycznym układzie sterowania, zaprojektowanym bez uwzględnienia opóźnienia, jego wprowadzenie może działać destabilizująco lub negatywnie na jakość sterowania. Z tego względu w przypadku znacząco dużych opóźnień wykorzystywane są układy specjalne. Konstrukcja przedstawionego na rys. 2 układu sterowania bazuje na strukturze klasycznego predyktora Smitha. Jest to rodzaj regulatora predykcyjnego, który był opracowany z myślą o systemach sterowania, które charakteryzują się długimi oraz nieuniknionymi opóźnieniami. W jego strukturze zaimplementowano model bez opóźnień oraz samo opóźnienie, z dwiema pętlami sprzężenia zwrotnego.

Bazując na koncepcji sterowania układów z opóźnieniami z wykorzystaniem predyktora Smitha przyjęto, że przybliżony model układu bez opóźnień dany jest w następującej postaci:

$$\hat{y}_p(k) = \hat{y}_p(k-1) + u(k-1) - h(k) \quad (5)$$

oraz model opóźnienia zmiennego w czasie w postaci:

$$\hat{x}(k) = q(k-1)\hat{x}(k-1) + \hat{y}_p(k - \tau_p + 1) \quad (6)$$

$$\hat{y}(k) = [1 - q(k - \tau_s)]\hat{x}(k - \tau_s). \quad (7)$$

Model regulatora PID dla błędu sterowania modelu przybliżonego bez opóźnienia  $\varepsilon(k)$  oraz błędu modelu przybliżonego z opóźnieniem  $y(k) - \hat{y}(k)$  dany jest w postaci:

$$u(k) = k_1 \varepsilon(k) + u_I(k) + k_6 [\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)] + k_3 [y(k) - \hat{y}(k)], \quad (8)$$

gdzie:

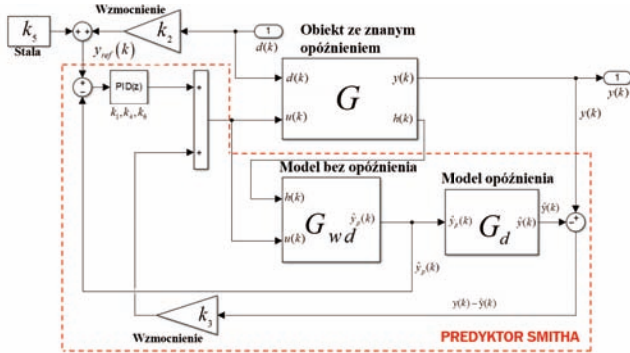
$$u_I(k) = u_I(k-1) + k_4 \varepsilon(k-1)$$

$$\varepsilon(k) = y_{ref}(k) - \hat{y}_p(k)$$

Przyjęto, że wartość referencyjna zapasów magazynowych  $y_{ref}(k)$  jest funkcją zależną od zapotrzebowania [16] daną w postaci:

$$y_{ref}(k) = k_2 d(k) + k_5. \quad (9)$$

Schemat układu sterowania został przedstawiony na rys. 2. Zmienne od  $k_1$  do  $k_6$  są parametrami układu regulacji. Nastawy układu sterowania obliczono stosując algorytm genetyczny.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania dla systemu magazynowego

Fig. 2. A block diagram of the control system for the inventory system

Ze względu na to, że opóźnienie występuje dla wejścia  $u(k)$ , a nie występuje dla wejścia  $d(k)$ , przekształcenie modelu systemu magazynowego z opóźnieniem na połączenie kaskadowe modelu bez opóźnienia i modelu opóźnienia nie może zostać zrealizowane dokładnie tak, jak ma to miejsce w klasycznej strukturze predyktora Smitha dla układów o jednym wejściu i jednym wyjściu. W rozpatrywanym rozwiązaniu zastosowano zmodyfikowaną strukturę układu sterowania dla układów z dużymi opóźnieniami wykorzystującą ideę predyktora Smitha z przybliżonym modelem układu bez opóźnienia dla obiektu o dwóch wejściach i jednym wyjściu, przy czym opóźnienie występuje tylko dla wejścia  $u(k)$ .

Ze względu na przybliżony charakter modelu bez opóźnienia, występujący w zaproponowanej strukturze sygnał  $\hat{y}(k)$  nie jest dokładnym odzwierciedleniem sygnału  $y(k)$  wychodzącego z obiektu regulacji w całym horyzoncie czasowym. Zmodyfikowana struktura układu regulacji ze wzmacnieniem  $k_3$ , która nie występuje w klasycznym układzie regulacji z predyktorem Smitha, została zaproponowana w efekcie przeprowadzonych badań empirycznych.

Na podstawie informacji o zapotrzebowaniu rynku na poszczególne produkty, układ sterowania wyznacza określoną liczbę produktów, które należy zamówić.

Głównymi czynnikami doboru sterowania jest minimalizacja kosztów i strat związanych z zajmowaną powierzchnią magazynu oraz przestojami.

Przestoje są sytuacją bardzo niekorzystną – zapotrzebowanie jest wówczas większe niż liczba sprzedanych produktów, gdyż zrealizowane zamówienia nie nadążają za zmieniającym się w czasie zapotrzebowaniem konsumentów. W tym celu tworzony jest zapas rezerwowy (buforowy) gwarantujący, że w kolejnych okresach zawartość magazynu nigdy nie spadnie do zera.

## 4. Kryterium optymalizacji

Zagadnienie optymalizacji układu sterowania wymaga sformułowania wskaźnika jakości procesu, który ma być optymalny. Rozważmy zagadnienie znalezienia optymalnych wartości parametrów  $k_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) układu dynamicznego przy ustalonej jego strukturze (rys. 2). W przypadku systemu magazynowego wskaźniki można opisać zależnościami:

$$j_1 = \sum_{k=n_0}^N [d(k) - h(k)] \quad (10)$$

$$j_2 = \sum_{k=n_0}^N y(k) \quad (11)$$

gdzie  $n_0 = \tau_p + \tau_s + \tau_o$  ( $\tau_p$ ) jest skumulowanym opóźnieniem układu dla  $u(k=0)$ , a  $N$  jest długością horyzontu czasowego.

Zależność (10) reprezentuje utracone możliwości realizacji sprzedaży. Z kolei wyrażenie (11) dotyczy zajętości powierzchni magazynowej.

W rozważanym przypadku zastosowano skalaryzację funkcji celu do postaci sumy ważonej:

$$j = w_1 j_1 + w_2 j_2 \quad (12)$$

gdzie  $w_1$  i  $w_2$  to współczynniki wagowe.

Dla modelu opisanego zależnościami (1)–(4) oraz układu regulacji opisanego równaniami (5)–(9) i wskaźnika jakości danego w postaci (10)–(12) zadanie optymalizacji można zdefiniować w postaci:

$$\min_{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6} j \quad (13)$$

przy ograniczeniach:

$$k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, k_3 \geq 0, k_4 \geq 0, k_5 \geq 0, k_6 \geq 0 \quad (14)$$

Zaproponowany układ ma na celu określenie optymalnej wielkości dostaw, która zapewnia minimalizację wskaźnika kosztu stanowiącego średnią ważoną łącznych kosztów zapasów, obejmujących koszty tworzenia zapasów i koszty ich utrzymania oraz utraconych korzyści, ograniczając ryzyko przestoju.

## 5. Badania symulacyjne

W przykładzie omówiono wyniki symulacji komputerowej przepływu materiałów w systemie magazynowym ze zmiennym w czasie opóźnieniem oczekiwania na transport. Przyjęto strukturę układu sterowania z rys. 2. Przedmiotem analizy jest wielkość zapasów w magazynie. Na potrzeby badań symulacyjnych układu sterowania dla dyskretnego, niestacjonarnego liniowego modelu z ograniczeniami sygnałów opisanego równaniami (1)–(4), układu regulacji opisanego równaniami (5)–(9) oraz wskaźnika jakości danego w postaci (10)–(12), przyjęto następujące wartości parametrów układu:  $\tau_p = \tau_s = 14$ ,  $w_1 = 1000$ ,  $w_2 = 1$ ,  $n_0 = 42$ ,  $N = 1000$ . Okres próbkowania jest równy 1 dobie. Do rozważań przyjęto zmienne w czasie zapotrzebowanie na rynku

(rys. 3). Jako funkcję  $q(k)$  przyjęto funkcję periodyczną, daną w następującej postaci:

$$q(k) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \text{rem}(k, 14) = 0 \\ 1 & \text{dla } \text{rem}(k, 14) \neq 0 \end{cases} \quad (15)$$

gdzie funkcja  $\text{rem}$  jest resztą z dzielenia.

Do rozwiązania zadania optymalizacji (16)–(17) zastosowano algorytm genetyczny z następującymi parametrami: liczebność populacji 200, liczba osobników elitarnych 10, udział krzyżowania 0,8.

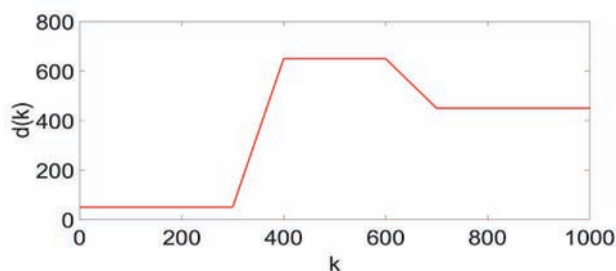
Rozwiązaniem zadania optymalizacji są następujące wartości parametrów:

$$k_1 = 1,26, k_2 = 56,7, k_3 = 0,853, k_4 = 0,138, k_5 = 342, k_6 = 0,113$$

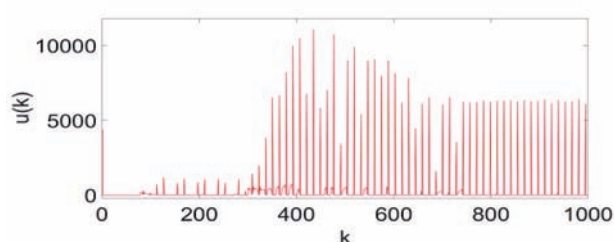
oraz odpowiadające im wartości wskaźników kosztu:

$$j = 1,03 \cdot 10^7, j_1 = 0,000377 \cdot 10^7, j_2 = 0,652 \cdot 10^7.$$

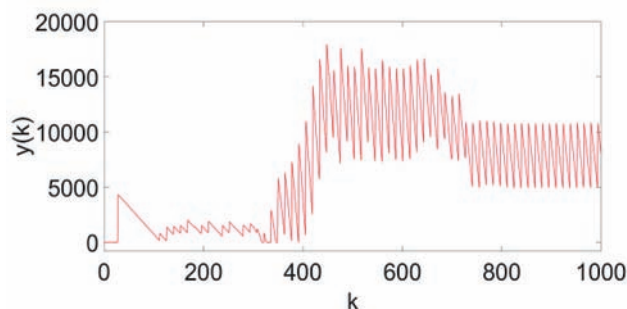
Dla przyjętych współczynników wagowych  $w_1$  i  $w_2$  utrzymywany poziom zapasów w magazynie (rys. 5) umożliwił pokrycie zapotrzebowania przez okres około 28 dni. Ze względu na wysoką wartość współczynnika  $w_1 = 1000$  możliwe jest ograniczenie przestojów kosztem utrzymywania większych zapasów w magazynie. Wartość zapasów magazynowych  $y(k)$  nadąża



Rys. 3. Założona funkcja zapotrzebowania rynku na produkty  
Fig. 3. Presumed function of market demand for products



Rys. 4. Przebieg zamówień dla założonej funkcji zapotrzebowania rynku  
Fig. 4. The course of orders for the presumed function of market demand



Rys. 5. Stan zapasów magazynowych w funkcji czasu dyskretnego dla założonej funkcji zapotrzebowania rynku  
Fig. 5. The level of stocks in the discrete time function for the presumed function of market demand

w sposób w przybliżeniu liniowy za zapotrzebowaniem  $d(k)$ . Wartość referencyjna dla układu przybliżonego  $y_{ref}(k)$  jest około dwukrotnie wyższa od maksymalnej wartości  $y(k)$ . Ze względu na różnicę między modelem przybliżonym bez opóźnienia a obiektem sterowania, w szczególności zmiennym w czasie opóźnieniem  $\tau_o(k)$ , w układzie występują różnice między poziomami wartości sygnałów  $y(k)$  oraz  $\hat{y}_p(k)$ . Dla układu przybliżonego bez opóźnienia dostawy są realizowane codziennie, podczas gdy w rozpatrywanym układzie dostawy następują nie częściej niż co 14 dni. Oznacza to, że wielkość zapasów magazynowych  $y(k)$  musi pokryć co najmniej 14 kolejnych dni zapotrzebowania rynku  $d(k)$ . Maksima lokalne (rys. 5) występują w chwili dostarczenia zamówienia do magazynu, zaś wyznaczona przez układ sterowania wielkość zamówień przedstawia rys. 4.

## 6. Podsumowanie

W systemach magazynowych opóźnienie związane z czasem przejścia produktów od magazynu do klienta jest często zmienne w funkcji czasu. W środowisku MATLAB/Simulink przeprowadzono badania symulacyjne dla scenariusza zmian, w którym przyjęto, że:

- model dynamiczny jest niestacjonarny ze znacznym opóźnieniem, w układzie występują opóźnienia stałe i zmienne w czasie,
- priorytetem jest minimalizacja przestojów, co odzwierciedla duża wartość wagi we wskaźniku (12),
- układ jest autonomiczny i nie stanowi części łańcucha dostaw, w którym występują centra dystrybucyjne oraz ogniwa pośredniczące,
- zapotrzebowanie klientów jest zmienne w czasie, według przyjętego deterministycznego scenariusza zmian  $d(k)$ . Pomiar zapotrzebowania nie jest obciążony zakłóceniami o charakterze stochastycznym. Układ sterowania jest układem przyczynowym.

Ze względu na nieco inne podejście od prezentowanych w pracach związanych z zarządzaniem łańcuchem dostaw, w szczególności zmienne w czasie znaczne opóźnienia i inny cel układu regulacji, trudno o dokonanie szczegółowego porównania. Jednak zaprezentowaną metodę zarządzania zapasami, można w sposób uproszczony skonfrontować z klasyczną polityką zarządzania zapasami zawartą m.in. w [23], w której zamówienia są umieszczone na początku każdego okresu, tak aby zwiększyć poziom zapasów w górę do predefiniowanych poziomów na podstawie znanych, stałych w czasie opóźnień i zapotrzebowania rynku. Zaproponowane podejście oparte jest na modelu niestacjonarnym, zmiennym w czasie, przykładowym scenariuszu zapotrzebowania klientów oraz dokonywaniu zamówień w ilości i czasie określonym przez układ sterowania.

W następnych pracach planowane jest uwzględnienie wpływu przyjętego scenariusza na własności układu sterowania, stochastycznego charakteru zapotrzebowania odbiorców oraz uwzględnienie specyficznych efektów występujących w łańcuchu dostaw, m.in. efektu byczego bicza [23].

## Bibliografia

1. Skowronek C., Sarjusz-Wolski Z., *Logistyka w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2008.
2. Wróblewski K.J., *Podstawy sterowania przepływem produkcji [Foundations of production flow control]*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
3. Gola A., Korzan A., *Elementy komputerowo wspomaganego procesu sterowania produkcją z wykorzystaniem kart kanban*, Informatyczne Systemy Zarządzania, Vol. 2/2011, 39–51.
4. Dermout D., Weiss W., *Logistyczne sterowanie zapasami – komputerowe wspomaganie decyzji, Elastyczne łańcuchy dostaw – koncepcje, doświadczenia, wyzwania*, materiały kon-

- ferencyjne Logistics 2002, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2002.
5. Sarjusz-Wolski Z., *Strategia zarządzania zaopatrzeniem: Praktyka logistyki biznesu*, Agencja Wydawnicza „Placet”, Warszawa 1998.
  6. Rosenblatt M.J., Roll Y., *Warehouse capacity in a stochastic environment*, International Journal of Production Research, Vol. 26, No. 12/1988, 1847–1851.
  7. Ignaciuk P., Bartoszewicz A., *Dead-beat and reaching-law-based sliding-mode control of perishable inventory systems*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 59, No. 1/2011, 39–49.
  8. Ignaciuk P., Bartoszewicz A., *LQ optimal sliding mode supply policy for periodic review inventory systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 55 No. 1/2010, 269–274.
  9. Leńniewski P., Bartoszewicz A., *Non-switching reaching law based discrete time quasi-sliding mode control with application to warehouse management problem*, World Congress. Vol. 19, No. 1/2014.
  10. Ignaciuk P., Bartoszewicz A., *Linear-quadratic optimal control of periodic-review perishable inventory systems*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5/2012, 1400–1407.
  11. Rudnik K., Franczok K., *Usprawnienie przepływu materiałów w magazynie na przykładzie sterowania rozmytego*, „Logistyka”, Nr 4/2014.
  12. Miall R.C., Weir D.J., Wolpert D.M., Stein J.F., *Is the cerebellum a smith predictor?* Journal of Motor Behavior, Vol. 25, No. 3/1993, 203–216.
  13. Grzyb S., Orłowski P., *Congestion control in computer networks - Application of piece-wise affine controller and particle swarm optimization*, in 19th Int. Conf. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, Poland, 2014, 834–838, DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957465.
  14. Grzyb S., Orłowski P., *Model matematyczny kanału komunikacyjnego z zatoryem w sieciach o zmiennych w czasie parametrach*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 59, Nr 11/2013, 1151–1154.
  15. Grzyb S., Orłowski P., *Zastosowanie uproszczonych charakterystyk częstotliwościowych do analizy kanału komunikacyjnego o zmiennych w czasie parametrach*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 60, Nr 5/2014, 317–320.
  16. Grzyb S., Orłowski P., *Congestion feedback control for computer networks with bandwidth estimation*, Proc. 20th Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, Poland, 2015.
  17. Ignaciuk P., Bartoszewicz A., *Discrete-time sliding-mode congestion control in multisource communication networks with time-varying delay*, IEEE Trans. on Control Systems Technology 19, 2010.
  18. Chołodowicz E., Orłowski P., *Dynamiczny dyskretny model systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem*, „Logistyka”, Nr 4/2015, 31–35.
  19. Orłowski P., *Convergence of the Discrete-Time Nonlinear Model Predictive Control with Successive Time-Varying Linearization along Predicted Trajectories*, Electronics and Electrical Engineering, Vol. 113, No. 7/2011, 27–31.
  20. Bartoszewicz A., Nowacka-Leverton A., *Time-varying sliding modes for second and third order systems*, Vol. 382, Springer, 2009.
  21. Orłowski P., *Complexity analysis of the piece-wise affine approximation for the car on the nonlinear hill model related to discrete-time, minimum time control problem*, Electronics and Electrical Engineering, Vol. 20, No. 10/2014, 3–6.
  22. Orłowski P., *Generalized feedback stability for periodic linear time-varying, discrete-time systems*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences – Polish Academy of Sciences, Vol. 60, No. 1/2012, 171–178.
  23. Luong H.T., *Measure of bullwhip effect in supply chains with autoregressive demand process*, European Journal of Operational Research, Vol. 180, No. 3/2007, 1086–1097.

## Inventory goods flow control system using Smith predictor

**Abstract:** There are a number of theorems and techniques that view inventory management from variant perspectives. The recent progress in research has resulted in innovative and more general techniques that can reduce the supply chain costs fundamentally. Modern inventory control is anchored in vastly advanced and complex models, which require considerable computational efforts. In this paper, we use a mathematical model of a warehouse system with time-varying delivery delay and adapt control system in order to apply it to the problem of goods flow in inventory systems. On the basis of the analysis of the inventory system, we propose a control system, then made its initial verification in the way of computer simulation in MATLAB/Simulink. The concept of improving the flow of materials is based on the structure of the Smith predictor and the PID controller. We perform optimization studies using genetic algorithm. Two quality indicators are subjected to minimization: the total costs of creating and maintaining inventories and differences between the demand and sales of products – the value of providing on whether the storage system keep up with the changing needs of the market (avoid stoppages). In this article, we mainly want to show that our idea of control system is able to achieve a high service level with maintaining a given inventory capacity to avoid redundancy.

**Keywords:** inventory control, inventory system, variable delay, discrete-time systems, Smith predictor, control systems, PID controller

## Ewelina Chołodowicz

cholodowicz.ewelina@gmail.com

Studentka na Wydziale Elektrycznym, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Laureatka projektu „Zachodniopomorskie Talenty – Regionalny System Stypendialny” w latach 2011/2012. Aktualne zainteresowania naukowe dotyczą wybranych zagadnień modelowania, symulacji i sterowania układów dynamicznych.



## dr hab. inż. Przemysław Orłowski, prof. ZUT

przemyslaw.orlowski@zut.edu.pl

Profesor nadzwyczajny w Katedrze Sterownia i Pomiarów Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Główne kierunki badań naukowych to analiza i synteza układów sterowania, w szczególności układy dyskretne, układy niestacjonarne, układy nieliniowe i układy niepewne.

