



PRZEDSIĘBIORCZOŚĆ
I ZARZĄDZANIE

ŁÓDŹ - WARSZAWA 2016 | ISSN 1733-2486

XVII

TOM

12

ZESZYT

II

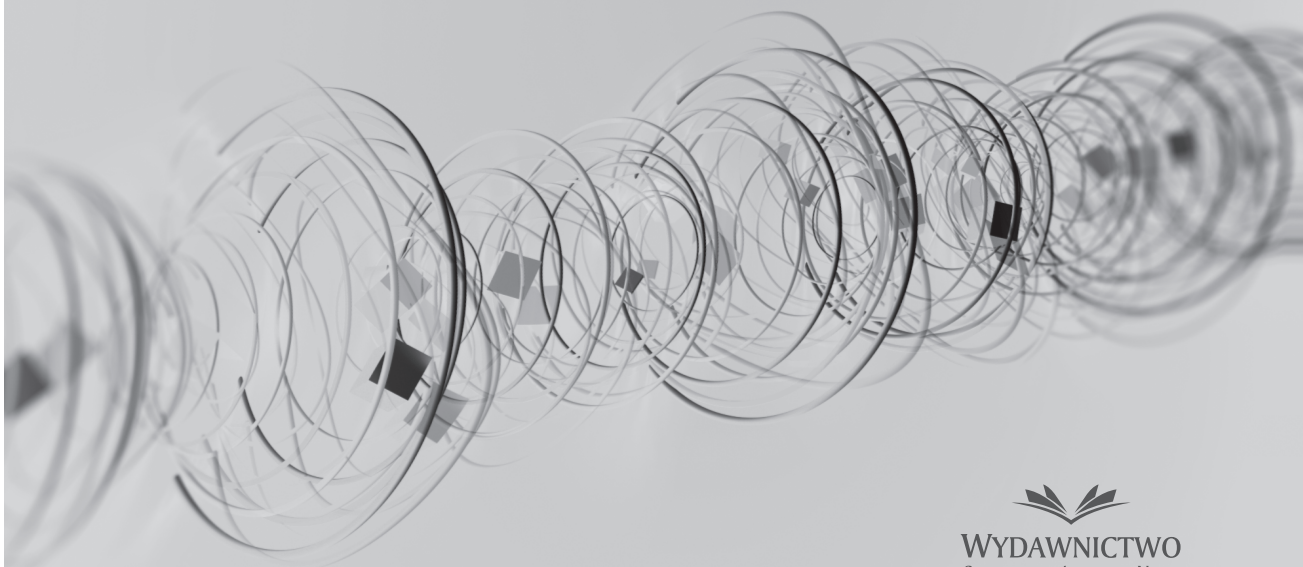
CZĘŚĆ

Redakcja naukowa:

Krzysztof Witkowski

Sebastian Saniuk

Systemy logistyczne w gospodarowaniu



WYDAWNICTWO
SPOŁECZNEJ AKADEMII NAUK

Zeszyt recenzowany

Redakcja naukowa: Krzysztof Witkowski i Sebastian Saniuk

Korekta: Dominika Świech, Witold Kowalczyk

Skład: Witold Kowalczyk

Projekt okładki: Marcin Szadkowski

© **Copyright:** Społeczna Akademia Nauk



ISSN 1733-2486

Wersja elektroniczna publikacji jest wersją podstawową

Dostępna na stronie: piz.san.edu.pl

Druk i oprawa: Mazowieckie Centrum Poligrafii | www.c-p.com.pl | biuro@c-p.com.pl

Przemysław Orłowski*

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Zastosowanie sterowania feedback-feedforward i predyktora Smitha do optymalizacji przepływu towarów w magazynie ze zmiennym w czasie opóźnieniem

Application of Feedback-feedforward Control with Smith Predictor for Inventory Goods Flow Optimization with Time-varying Delay

Abstract: The paper proposes the use of the automatic control system to control the system for supplementary orders for the warehouse in the presence of time-varying market demand and time-varying delay. A discrete-time, time-varying dynamic model of the ware-house system is assumed for the analysis. For the given model it is proposed a feedback-feedforward control system with the Smith predictor. The settings of the control system are evaluated by minimizing cost function using particle swarm optimization. The work contains the results of calculations and computer simulations for the assumed scenario for the market demand.

Key words: inventory system, automated order system, control system, Smith predictor, time-varying inventory model

Wprowadzenie

Zagadnienia sterowania przepływem towarów w systemach magazynowych są przedmiotem wielu prac [Zipkin 2000; Sarjusz-Wolski 2000; Niemczyk 2004; Nowa-

* przemyslaw.orlowski@zut.edu.pl

kowski 2011, ss. 8–10, Beier 2004; Sarimveis, Patrinos, Tarantilis, Kiranoudis 2008, ss. 3530–3561, Wróblewski 1993, ss. 10–21, Gola, Korzan 2011, ss. 39–51]. Celem sterowania jest utrzymanie odpowiedniego poziomu zapasów w stosunku do przewidywanego zapotrzebowania z uwzględnieniem specyfiki dostaw, w szczególności występujących opóźnień związanych z czasem niezbędnym na przygotowanie zamówienia uzupełniającego, oczekiwania na środek transportu oraz czasu niezbędnego na dostarczenie zamówienia uzupełniającego do magazynu.

Stosowanie odpowiednio dobranej strategii sterowania przepływem towarów umożliwia wyrównywanie różnych intensywności strumieni przepływów [Skowronek, Sarjusz-Wolski 2003], co pozwala na poprawę jakości obsługi i dostępności towarów [Wróblewski 1993, ss. 10–21]. Jednocześnie możliwa jest minimalizacja kosztów utrzymania zapasów, które stanowią znaczną część kosztów logistycznych [Dermout, Weiss 2002]. W licznej grupie czołowych japońskich firm proces produkcyjny prowadzony jest przy niemal zerowym stanie zapasów [Gola, Korzan 2011, ss. 39–51].

Stosowane podejścia do uzupełniania zapasów magazynowych opierają się na systemie dwuskrzynkowym lub systemie o stałym cyklu. Pojawiają się również metody dla systemów magazynowych z wykorzystaniem algorytmów sterowania układami dynamicznymi [Ignaciuk, Bartoszewicz 2011, ss. 39–49, Leśniewski, Bartoszewicz 2014, ss. 4589–4594, Dejonckheere, Disney, Lambrecht, Towill 2002, ss. 567–590] oraz metody wykorzystujące sposoby optymalizacji [Ignaciuk, Bartoszewicz 2010, ss. 269–274; Ignaciuk, Bartoszewicz 2012, ss. 1400–1407, Chołodowicz, Orłowski 2015b, ss. 55–60; Chołodowicz, Orłowski 2015c, ss. 568–572, Abrahamowicz, Orłowski P. 2016, ss. 5–10].

W pracy zaproponowano wykorzystanie układu regulacji automatycznej do sterowania systemem zamówień uzupełniających dla magazynu w obecności zmiennego w czasie zapotrzebowania rynku. Do analizy przyjęto dynamiczny dyskretny model systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem [Chołodowicz, Orłowski 2015a, ss. 31–35]. Dla danego modelu zaproponowany został układ sterowania z wykorzystaniem pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego (*feedback*), predyktora Smitha oraz sprzężenia w przód (*feedforward*). Nastawy układu regulacji zostały wyznaczone w wyniku minimalizacji wskaźnika kosztu za pomocą algorytmu rojowego. Jako kryterium jakości sterowania przyjęto wskaźnik minimalizujący koszty gromadzenia i utrzymania zapasów oraz utracone korzyści związane z brakiem możliwości wykorzystania zapotrzebowania rynku [Heyman, Sobel 1984]. W pracy zawarto wyniki obliczeń i symulacji komputerowych dla przyjętego scenariusza zmian zapotrzebowania rynku.

Model matematyczny układu

Model matematyczny systemu magazynowego został podany w pracy [Chołodowicz, Orłowski 2015a, ss. 31–35]. Zmienna $d(k)$ odzwierciedla zmienne w czasie zapotrzebowanie na rynku na towary z magazynu; przyjęto, że jest to pewna nieznana, ograniczona z góry funkcja: $0 \leq d(k) \leq d_{\max}$. Ilość produktów faktycznie wysłanych z magazynu $h(k)$ jest zależna od zapotrzebowania i od dostępnych zapasów magazynowych $y(k)$, zatem spełnione są następujące nierówności:

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

Jeżeli ilość produktów w magazynie w momencie czasu k jest wystarczająco duża $y(k) \geq d(k)$ wówczas zachodzi $d(k) = h(k)$.

W celu uwzględnienia w modelu zmiennego w czasie opóźnienia związanego z kumulacją produktów w oczekiwaniu na transport wprowadzono współczynnik wysyłki w chwili czasu k , określony w następujący sposób:

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

Ilość produktów oczekujących na wysyłkę w chwili czasu k , jest określona następującą zależnością:

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

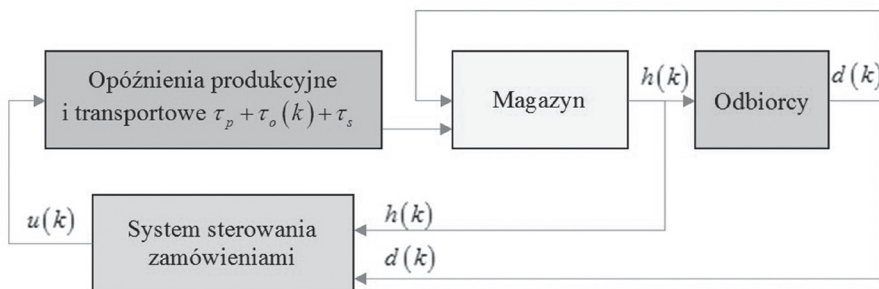
gdzie: τ_p – opóźnienie produkcyjne – czas potrzebny na wyprodukowanie zamówienia.

Ilość produktów zgromadzonych w magazynie w chwili czasu k , zwana stanem magazynu, jest dana w następujący sposób:

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

gdzie: $x(k) \geq 0$, $u(k) \geq 0$, τ_s – opóźnienie spedycyjne – czas niezbędny na przetransportowanie zamówionych produktów do magazynu.

Rysunek 1. Schemat poglądowy systemu magazynowego z układem sterowania



Źródło: Opracowanie własne.

Schemat blokowy analizowanego systemu został przedstawiony na rys. 1. Układ składa się z trzech głównych bloków: magazynu z układem sterowania, produkcji i transportu. Opóźnienie zależne od czasu $\tau_o(k)$ związane jest z oczekiwaniem na środek transportu i kumulacją zamówień.

Układ sterowania

Układ sterowania przepływem towarów ma na celu utrzymanie wystarczających zapasów w magazynie niezależnie od chwilowych zmian zapotrzebowania $d(k)$, tak aby nie doszło do sytuacji, w której magazyn nie będzie w stanie pokryć zapotrzebowania bądź zasób przechowywanych produktów będzie nieadekwatnie duży w stosunku do zapotrzebowania.

Ze względu na występowanie znaczących opóźnień w układzie sterowania został wykorzystany predyktor Smitha wraz z pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego oraz sprzężeniem w przód. Struktura układu regulacji została przedstawiona na rys. 2. Struktura ta wykorzystuje do sterowania model układu bez opóźnienia. Przybliżony model układu bez opóźnienia przyjęto w następującej postaci:

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

Model regulatora dany jest w następującej postaci:

$$u(k) = k_2 y_r(k) + k_3 (y_r(k) - \tilde{y}(k)) \quad (6)$$

Przyjęto, że wartość referencyjna zapasów magazynowych $y_r(k)$ jest funkcją proporcjonalną od zapotrzebowania daną w postaci:

$$y_r(k) = k_1 d(k) \quad (7)$$

gdzie:

k_1 – wzmacnienie wiążące dzienne zapotrzebowanie rynku na towary z magazynu i wartość referencyjną zapasów magazynowych,

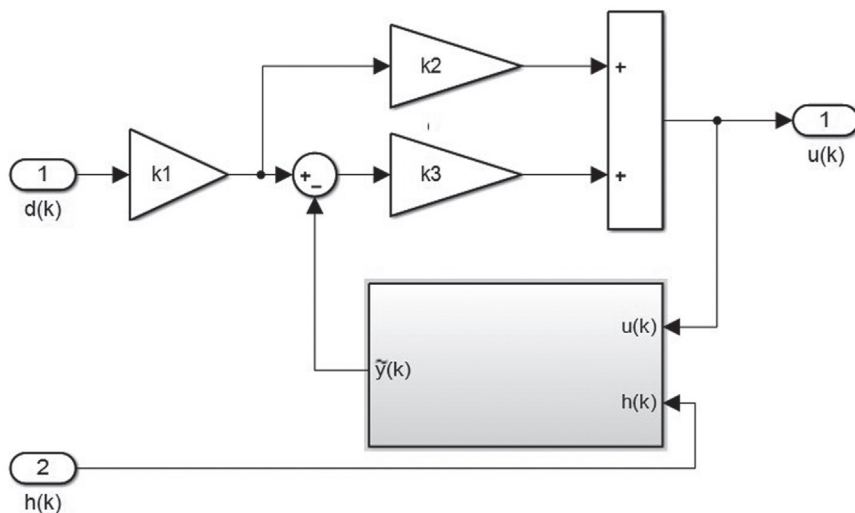
k_2 – wzmacnienie regulatora sprzężenia w przód,

k_3 – wzmacnienie regulatora w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Schemat układu sterowania został przedstawiony na rys. 2.

Układ sterowania wyznacza w każdej chwili wielkość zamówienia uzupełniającego. Parametry układu regulacji można dobrać poprzez rozwiązanie zadania optymalizacji. Ze względu na ścisły związek pomiędzy zmiennymi u , h oraz y do wyznaczenia sterowania możliwe jest wykorzystanie jedynie dwóch zmiennych: d oraz h , tak jak zostało to przedstawione na rys. 2. Ujemne sprzężenie zwrotne jest realizowane za pośrednictwem zmiennej h wchodzącej do modelu przybliżonego bez opóźnienia.

Rysunek 2. Schemat blokowy układu sterowania



Źródło: Opracowanie własne.

Optymalizacja układu sterowania

Jak wspomniano wcześniej, kryterium doboru sterowania jest minimalizacja kosztów związanych z zajmowaną powierzchnią magazynu oraz strat związanych z przestojami. W tym celu sformułowano następujący wskaźnik kosztu:

$$J = \sum_{k=n_0}^N \left(w_1 (d(k) - h(k)) + w_2 y(k) \right) \quad (8)$$

gdzie:

$n_0 = \tau_p + \tau_s + \tau_o(\tau_p)$ – skumulowane opóźnienie układu dla $u(k=0)$,

w_1, w_2 – współczynniki wagowe,

N – długość horyzontu czasowego analizy.

Zagadnienie znalezienia optymalnych wartości parametrów k_1, k_2, k_3 układu dynamicznego (1)–(4) przy jego strukturze danej (5)–(7) oraz danych $d(k)$ i $q(k)$ można zdefiniować w postaci następującego zadania optymalizacji:

$$\min_{k_1, k_2, k_3} J \quad (9)$$

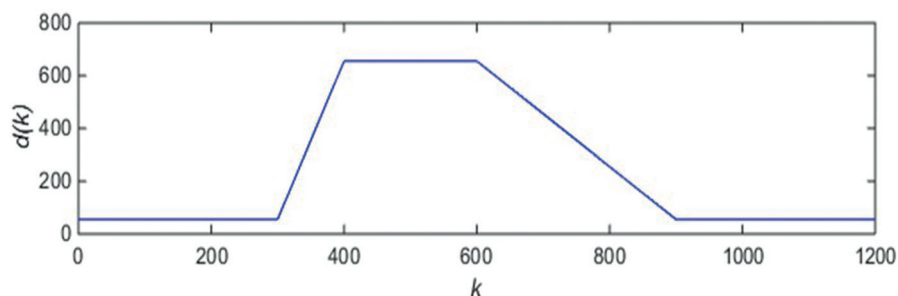
W dalszej części do wyznaczenia wartości k_1, k_2, k_3 wykorzystano algorytm rojowy.

Przykład obliczeniowy

W przykładzie dokonano obliczeń oraz przeprowadzono symulacje komputerowe dla przepływu towarów w systemie magazynowym ze zmiennym w czasie opóźnieniem. Przedmiotem analizy jest wielkość zapasów w magazynie w zależności od zmiennego w czasie zapotrzebowania rynku $d(k)$ zilustrowanego na rys. 3, układu regulacji z rys. 2 i wskaźnika kosztu (8).

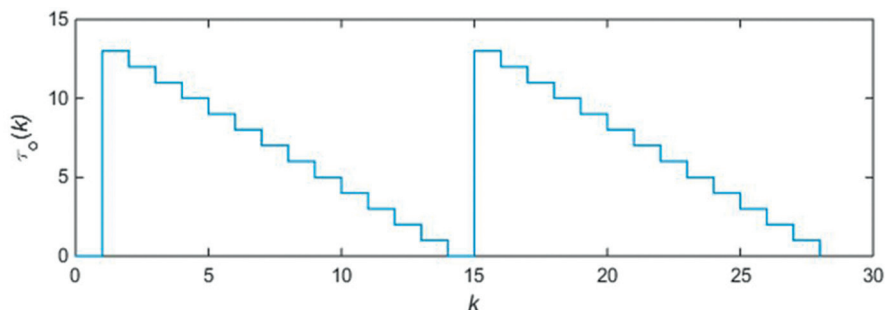
Przyjęto następujące wartości parametrów układu: $\tau_p = \tau_s = 14$, $w_1 = 100$, $w_2 = 1$, $n_0 = 28$, $N = 120$. Okres próbkowania wynosi 1 dzień. Opóźnienie $\tau_o(k)$ układu jest periodycznie zmienne w czasie w sposób pokazany na rys. 4, co odpowiada sytuacji, gdy zamówienia są komasowane, a wysyłki realizowane cyklicznie co 14 dni. Łączne opóźnienie występujące w układzie wynosi zatem od 28 do 41 dni, w zależności od momentu złożenia zamówienia.

Rysunek 3. Założona funkcja zapotrzebowania rynku na produkty



Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 4. Zmienne w czasie opóźnienie związane z oczekiwaniem na transport

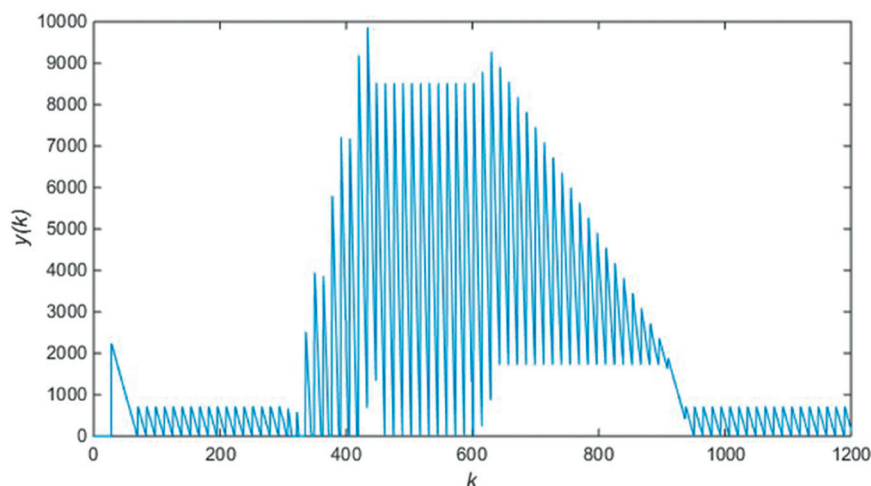


Źródło: Opracowanie własne.

Do rozwiązania zadania optymalizacji wykorzystano algorytm rojowy z parametrami: liczebność populacji 50, atrakcyjność społeczna 1,5, atrakcyjność poznawcza 0,5. Rozwiązaniem zadania optymalizacji są następujące wartości parametrów: $k_1=35,4$, $k_2=0,162$, $k_3=1,02$. Uzyskany stan zapasów magazynowych został zilustrowany na rys. 5, a dokonywane zamówienia na rys. 6.

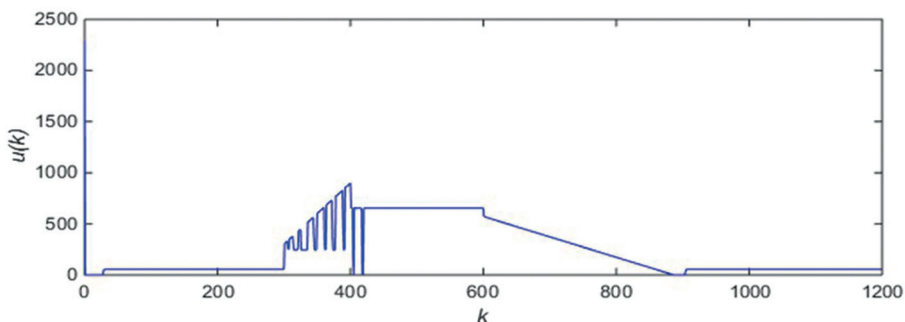
Przestoje, tj. momenty, w których zapotrzebowanie było większe niż zasoby magazynowe, zdarzały się jedynie do momentu pierwszej dostawy, tj. dla $k < 28$ oraz w okresie wzrostu zapotrzebowania tj. dla $300 < k < 400$. Stanowiły one jedynie 4,2% obrotu w rozpatrywanym okresie przy 14-krotnym wzroście zapotrzebowania i utrzymywaniu zapasów magazynowych na minimalnym poziomie.

Rysunek 5. Stan zapasów magazynowych w funkcji czasu



Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 6. Zamówienia dokonywane przez układ automatycznego sterowania



Źródło: Opracowanie własne.

Podsumowanie

Zaproponowana w pracy struktura układu sterowania umożliwia automatyczne sterowanie systemem zamówień uzupełniających do magazynu, gdzie występuje duże, zmienne w czasie opóźnienie dostaw uzupełniających oraz przy zmiennym w czasie zapotrzebowaniu na towary. Nastawy układu regulacji zostały dostrójone dla przyjętego scenariusza zmian zapotrzebowania towarów, w którym występowały znaczne, prawie 12-krotne zmiany w zapotrzebowaniu towarów – od 55 do 655 szt. dziennie.

Układ sterowania utrzymywał minimalny poziom zapasów mimo bardzo dużego, zmiennego w czasie opóźnienia pomiędzy momentem złożenia zamówienia a dostawą towarów do magazynu sięgającego od 28 do 41 dni. Dla przyjętych w pracy współczynników wagowych przestoje stanowiły 4% obrotu i 6% czasu pracy. Gromadzone zapasy dla prawie całego horyzontu czasowego były upływniane do następnej dostawy.

W pracy pokazano na przykładzie obliczeniowym, że zastosowanie metod optymalizacji parametrycznej w połączeniu ze strukturą układu regulacji z wykorzystaniem struktury *feedback-feedforward* wraz z predyktorem Smitha umożliwia ograniczenie ilości zapasów magazynowych dla układu, w którym występują duże zmienne w czasie opóźnienia wraz ze zmiennym w czasie zapotrzebowaniem klientów i może być alternatywą dla klasycznych metod dokonywania zamówień m.in. systemu dwuskrzynkowego bądź o stałym cyklu.

Bibliografia:

Abrahamowicz E., Orłowski P. (2016), *Zastosowanie regulatora ułamkowego rzędu PD do automatycznego sterowania zamówieniami dla magazynu ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 20, nr 2/2016.

Beier F. J. (2004), *Logistyka*, Szkoła Główna Handlowa, Warszawa.

Chołodowicz E., Orłowski P. (2015a), *Dynamiczny dyskretny model systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem*, „Logistyka”, nr 4.

Chołodowicz E., Orłowski P. (2015b), *Sterowanie przepływem towarów w magazynie z wykorzystaniem predyktora Smitha*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, t. 19, nr 3.

Chołodowicz E., Orłowski P. (2015c), *A periodic inventory control system with adaptive reference stock level for long supply delay*, „Measurement Automation Monitoring”, t. 61, nr 12.

Dejonckheere J., Disney S. M., Lambrecht M. R., Towill D. R. (2002), *Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach*, „European Journal of Operational Research”, t. 147, nr 3.

Dermout D., Weiss W. (2002), *Logistyczne sterowanie zapasami – komputerowe wspomaganie decyzji*, Międzynarodowa Konferencja Logistyczna, Poznań.

Gola A., Korzan A. (2011), *Elementy komputerowo wspomaganego procesu sterowania produkcją z wykorzystaniem kart kanban*, „Informatyczne Systemy Zarządzania”, z. 2.

Heyman, D., Sobel, M. (1984), *Stochastic Models in Operations Research*, McGraw-Hill.

Ignaciuk P., Bartoszewicz A. (2010), *LQ optimal sliding mode supply policy for periodic review inventory systems*, „IEEE Trans. on Automatic Control”, t. 55, nr 1.

Ignaciuk P., Bartoszewicz A. (2012), *Linear-quadratic optimal control of periodic-review perishable inventory systems*, „IEEE Transactions on Control Systems Technology”, t. 20, nr 5.

Ignaciuk P., Bartoszewicz A. (2011), *Dead-beat and reaching-law-based sliding-mode control of perishable inventory systems*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences”, t. 59, nr 1.

Leśniewski, P., Bartoszewicz A. (2014), *Non-switching reaching law based discrete time quasi-sliding mode control with application to warehouse management problem*, 19th IFAC World Congress.

Niemczyk A. (2004), *Magazynowe systemy informatyczne funkcjonalność systemów*, Instytut Logistyki i Magazynowania.

Nowakowski T. (2011), *Niezawodność systemów logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław.

Sarimveis H., Patrinos P., Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T. (2008), *Dynamic modeling and control of supply chain systems:a review*, „Computers & Operations Research”, t. 35, nr 11.

Sarjusz-Wolski Z. (2000), *Sterowanie zapasami w przedsiębiorstwie*, Warszawa.

Skowronek C., Sarjusz-Wolski Z. (2003), *Logistyka w przedsiębiorstwie*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.

Wróblewski J. (1993), *Podstawy sterowania przepływem produkcji*, WNT, Warszawa.

Zipkin P.H. (2000), *Foundations of Inventory Management*, McGraw- Hill, New York.