

ANALIZA PORÓWNAWCZA REGULATORÓW NIECAŁKOWITEGO I CAŁKOWITEGO RZĘDU W ZASTOSOWANIU DO DWUKRYTERIALNEGO PROBLEMU STEROWANIA WIELKOŚCIĄ ZAMÓWIEŃ DLA SYSTEMU MAGAZYNOWEGO ZE ZMIENNYM W CZASIE OPÓŹNIENIEM DOSTAW

Ewa Abrahamowicz^a, Przemysław Orłowski^{1b}

¹Katedra Sterowania i Pomiarów, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

^aabrahamowicz@onet.pl, ^bprzemyslaw.orlowski@zut.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono propozycję rozwiązania problemu automatycznego sterowania wielkością zamówień dokonywanych w systemach magazynowych z dużymi opóźnieniami. Zaproponowano zastosowanie struktury regulatora niecałkowitego rzędu ze sprzężeniem w przód i w tył oraz ze zmodyfikowanym predyktorem Smitha. Uzyskane wyniki porównane zostały z dwoma alternatywnymi układami sterowania: rzędu całkowitego oraz rzędu ułamkowego o mniejszym stopniu swobody. Do wyznaczenia nastaw układu regulacji został wykorzystany algorytm optymalizacji wielokryterialnej SPEA2. Wyniki uzyskane dla poszczególnych regulatorów zostały zobrazowane w postaci frontów Pareto-optymalnych oraz wybranych odpowiedzi czasowych układu.

Słowa kluczowe: regulator ułamkowego rzędu, aproksymacja Eulera, optymalizacja wielokryterialna, systemy magazynowe, systemy dyskretne

COMPARATIVE ANALYSIS OF FRACTIONAL AND INTEGER ORDERS CONTROLLERS FOR TWO-CRITERIA AUTOMATIC ORDERS CONTROL SYSTEM FOR WAREHOUSE WITH VARIABLE TIME DELAY

Summary

The paper presents a new fractional order structure for making orders in the automatic control warehouse system with variable time delay. Considered control system uses a discrete feedback-feedforward fractional order PD^μ , PD^ν controller with Smith predictor. Results are compared with two alternative controllers: integer order controller and fractional order controller with reduced complexity. In order to obtain controller parameters the multi-objective optimization algorithm SPEA2 is employed. Results are shown and compared on Pareto plot as well as the selected time responses of the system.

Keywords: fractional order controller, Euler approximation, multi-disciplinary optimization, inventory systems, discrete-time systems

1. WPROWADZENIE

Ze względu na rozszerzającą się globalizację dzisiejsze przedsiębiorstwa muszą mierzyć się z dużą konkurencyjnością. Aby sprostać wymaganiom klientów firmy, są zobowiązane wykazać się elastycznością na szybkie zmiany zapotrzebowania rynku m.in. poprzez skracanie cykli wdrażania nowych wyrobów oraz niezwłoczną realizację zleceń produkcyjnych przy zachowaniu standardów jakości i ceny. Przedsiębiorstwa często dążą do spełnienia powyższych celów, zmieniając swoją strategię działania za pomocą wdrażania narzędzi informatycznych, ponieważ pozwalają one wykorzystać możliwości oferowane przez współczesną koncepcję logistyki [10],[8].

Na końcową cenę produktu w znacznej mierze wpływają koszty logistyczne. Jednym ze sposobów ich zmniejszenia jest planowanie dotyczące umiejętnego zarządzania zapasami, tzn. tak, aby uniknąć nadmiernych stanów magazynowych, nie obniżając jednocześnie jakości obsługi klienta [10],[8],[16]. W celu optymalnego rozwiązania wzajemnie powiązanych problemów dotyczących kształtowania zapasów [9] stosuje się instrumenty sterowania zapasami, których początki sięgają już 1915r [21]. Służą one do przewidywania wielkości potrzeb oraz utrzymywania zapasu bezpieczeństwa [15]. Jednak nie spełniają wszystkich oczekiwań przedsiębiorstw, co wpływa na ciągły, dynamiczny rozwój bardziej zaawansowanego oprogramowania.

Jedną z dziedzin inżynierii pracującą nad poprawą elastyczności przedsiębiorstw jest automatyka, która stara się stworzyć system automatycznego sterowania zamówieniami. Problem generowania zamówień próbowano rozwiązać, wykorzystując metody sterowania układami dynamicznymi [14],[13],[12],[20],[6] oraz optymalizację [7],[5],[1].

W niniejszej pracy do realizacji automatycznego sterowania zamówieniami wykorzystany został regulator niecałkowitego rzędu. Początki teorii rachunku różniczkowego i całkowitego ułamkowego rzędu sięgają już XVII wieku, jednak rozwój praktycznego zastosowania datuje się na drugą połowę XX wieku [3]. Wykorzystywane przez automatyków regulatory o dodatkowych stopniach swobody są rozszerzeniem i uzupełnieniem definicji regulatorów PID [3],[17]. Dodatkowy integrator λ oraz człon różniczkujący μ pozwalają skuteczniej dopasować regulator do stawianych wymagań, dzięki czemu poprawia się jakość regulacji, co zostało wykazane w pracach [18],[19]. Problem doboru nastaw regulatora $PI^\lambda D^\mu$ rozpatrywany był w pracach [18],[11],[4]. Do praktycznej realizacji regulatora niecałkowitego rzędu wykorzystuje się aproksymację transmitancji regulatora realizowaną za pomocą funkcji wymiernych, a następnie wyznacza się realizację wymiernej transmitancji aproksymującej [22].

Rozszerzenie układu niecałkowitego rzędu na układ dyskretny przedstawiono w monografii [17].

Celem niniejszej pracy jest porównanie jakości działania regulatorów niecałkowitego rzędu o dwóch dodatkowych stopniach swobody, niecałkowitego rzędu o jednym dodatkowym stopniu swobody przedstawionego w pracy [1] oraz regulatora rzędu całkowitego. Parametry powyższych regulatorów wyznaczone będą w wyniku dokonania optymalizacji wielokryterialnej. Jakość działania będzie oceniana poprzez porównanie wartości wskaźników jakości j_1 reprezentującego utracone korzyści oraz j_2 stanowiącego o zajętości powierzchni magazynowej.

2. MODEL MATEMATYCZNY

Wykorzystywany w niniejszym artykule model matematyczny wywodzi się z pracy [6], gdzie został on szczegółowo omówiony. Poniższy opis przedstawia najistotniejsze informacje.

Podstawową zmienną wejściową układu jest $d(k)$, która stanowi o zmiennym w czasie zapotrzebowaniu rynku, które tworzone jest na podstawie wymagań poszczególnych klientów. Zmienna $h(k)$ jest ilością produktów rzeczywiście wysłanych z magazynu. Obie zmienne muszą spełnić następującą zależność:

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

Najkorzystniejszym stanem magazynu jest sytuacja, kiedy $d(k) = h(k)$ przy jednoczesnym zachowaniu jak najmniejszego stanu magazynu, o którym stanowi zmienna $y(k)$ określona w następujący sposób:

$$0 \leq y(k) \leq y_{max} \quad (2)$$

W sytuacji, gdy $h(k) < d(k)$, generowane są przestoje pracy magazynu, które obniżają poziom obsługi klienta oraz powodują straty korzyści.

Do stosowanego modelu został wprowadzony dyskretny współczynnik wysyłki $q(k)$, który uwzględnia zmienne w czasie opóźnienie dostaw, wynikające z opóźnień produkcyjnych oraz spedycyjnych. W chwili czasu k , współczynnik wysyłki określony jest następująco:

$$q(k) = \begin{cases} 0 - \text{wysyłka} \\ 1 - \text{oczekiwanie na transport} \end{cases} \quad (3)$$

Liczba produktów oczekujących na wysyłkę do magazynu w chwili k określona jest równaniem stanu:

$$x(k) = q(k-1)x(k-1) + u(k - \tau_p) \quad (4)$$

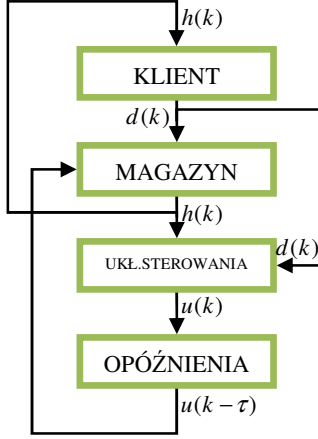
Stosowana powyżej zmienna $u(k)$ określa ilość zamówionych w chwili k produktów, natomiast τ_p oznacza skorelowane z $u(k)$ opóźnienia produkcyjne.

Gdy $x(k) \geq 0$ oraz $u(k) \geq 0$, stan magazynu można przedstawić za pomocą poniższego równania:

$$y(k) = y(k-1) + (1 - q(k - \tau_s))x(k - \tau_s) - h(k) \quad (5)$$

gdzie τ_s oznacza opóźnienia spedycyjne.

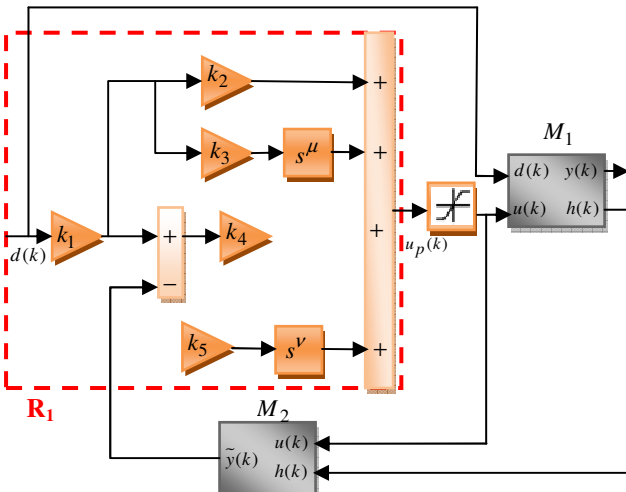
Na rys. 1 przedstawiono poglądowy schemat struktury analizowanego systemu:



Rys. 1 Schemat struktury systemu

3. UKŁAD STEROWANIA

W przyjętym w pracy układzie sterowania, przedstawionym na rys. 2. zastosowano strukturę regulatora w sprzężeniu w przód z kompensatorem k_2, k_3, s^μ . W sprzężeniu w tył pracuje regulator PD^v , w którego skład wchodzi zmienne k_4, k_5, v . Wzmocnienie k_1 ma na celu adaptację wielkości wartości zadanej do zmiennego zapotrzebowania rynku. Celem regulatora znajdującego się w sprzężeniu feedforward jest dostosowanie wielkości zamówienia do zmiennej w czasie wartości zadanej. Regulator pracujący w sprzężeniu zwrotnym ma na celu zmniejszenie uchybu regulacji, przy czym człon różniczkujący ułamkowego rzędu działa wyłącznie na wartość regulowaną, jaką jest stan magazynu. Ma to na celu ograniczanie wpływu zmian wartości zadanej na akcję różniczkującą. Wpływ ten został uwzględniony w regulatorze znajdującym się w sprzężeniu w przód.



Rys. 2 Struktura układu sterowania zamówieniami w magazynie

Przedstawiony na rys. 2 sygnał $u_p(k)$ jest sygnałem pomocniczym, wyjściowym z regulatora. Dyskretny sygnał $u(k)$ powstaje na skutek saturacji sygnału $u_p(k)$. Widoczne na schemacie bloki M_1 to model systemu magazynowego, natomiast M_2 jest uproszczonym modelem bez opóźnienia. Przy czym blok M_2 spełnia rolę zmodyfikowanego predyktora Smitha, którego zadaniem jest przewidywanie stanów magazynowych w celu zapobiegania destabilizacji układu oraz kształtowania wielkości zamówienia w następujący sposób:

$$\tilde{y}(k) = \tilde{y}(k-1) + u(k-1) - h(k) \quad (6)$$

Dokładne fizyczne odwzorowanie regulatora ułamkowego rzędu jest niemożliwe. W niniejszej pracy do praktycznej realizacji regulatorów PD^μ, PD^v wykorzystuje się aproksymację metodą Eulera [22]. Do realizacji operatora różniczkowania niecałkowitego rzędu s^μ wyznacza się nowy operator:

$$(\omega(z^{-1}))^\mu = \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)^\mu \quad (7)$$

gdzie T oznacza okres impulsowania, a z^{-1} jest operatorem opóźnienia o jeden takt. Analogicznie można zdefiniować operator s^v . Na tej podstawie można wyznaczyć dyskretną funkcję przejścia z wykorzystaniem sygnału u_p :

$$u_p(z) = \left(k_2 + k_3 \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)^\mu + k_4\right) k_1 d(z) + \left(k_5 \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)^v - k_4\right) \tilde{y}(z) \quad (8)$$

Do wyznaczenia wymiernej funkcji przejścia operatorów różniczkowania rzędu ułamkowego zastosowano rozwinięcie w ułamek łańcuchowy, dla operatora s^μ otrzymano:

$$(\omega(z^{-1}))^\mu \approx \left(\frac{1}{T}\right)^\mu CFE\{(1-z^{-1})^\mu\}_{p,q} = \left(\frac{1}{T}\right)^\mu \frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})} \quad (9)$$

gdzie CFE oznacza rozwinięcie transmitancji niewymiernej w ułamek łańcuchowy. Kolejną czynnością jest określenie skończonej liczby elementów rozwinięcia i wyznaczenie wielomianów $P(z^{-1})$ i $Q(z^{-1})$ o odpowiednich rzędach aproksymacji p, q .

$$\frac{P(z^{-1})}{Q(z^{-1})} = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_m z^{-p}}{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} + \dots + q_m z^{-q}} \quad (10)$$

Dla wykorzystywanego w niniejszej pracy rzędu aproksymacji wynoszącego 5 oraz dla metody aproksymacji Eulera współczynniki p, q wyznacza się z zależności:

$$\begin{aligned} p_0 &= q_0 = 30240 \\ p_1 &= -15120\mu - 75600 \\ p_2 &= 3360\mu^2 + 30240\mu + 67200 \\ p_3 &= -(420\mu^3 + 5040\mu^2 + 19740\mu + 25200) \\ p_4 &= 30\mu^4 + 420\mu^3 + 2130\mu^2 + 4620\mu + 3600 \\ p_5 &= -(\mu^5 + 15\mu^4 + 85\mu^3 + 225\mu^2 + 274\mu + 120) \quad (11) \\ q_1 &= 15120\mu - 75600 \\ q_2 &= 3360\mu^2 - 30240\mu + 67200 \\ q_3 &= 420\mu^3 - 5040\mu^2 + 19740\mu - 25200 \\ q_4 &= 30\mu^4 - 420\mu^3 + 2130\mu^2 - 4620\mu + 3600 \\ q_5 &= \mu^5 - 15\mu^4 + 85\mu^3 - 225\mu^2 + 274\mu - 120 \end{aligned}$$

Adekwatnie do powyżej przedstawionych wzorów postępuje się podczas aproksymacji regulatora PD^v.

Celem realizowanym przez powyższy układ sterowania jest utrzymanie optymalnego stanu zapasów magazynowych. Zapas powinien być na tyle duży, aby zawsze spełniał zapotrzebowanie klientów i nie dopuszczał do powstawania przestojów, lecz jednocześnie powinien być możliwie mały w celu minimalizacji kosztów związanych z magazynowaniem. Na podstawie powyższego stwierdzenia sformułowano dwa wskaźniki jakości. Wskaźnik j_1 reprezentuje utracone korzyści, które generowane są, gdy magazyn nie jest w stanie sprostać popytowi, natomiast wskaźnik j_2 reprezentuje zajętość powierzchni magazynu:

$$j_1 = \sum_{k=n_0}^N [d(k) - h(k)] \quad (12)$$

$$j_2 = \sum_{k=n_0}^N y(k) \quad (13)$$

W powyższych zależnościach n_0 jest sumą opóźnień występujących w układzie sterowania dla $k=0$: $n_0 = \tau_p + \tau_0(\tau_p) + \tau_s$, gdzie τ_0 to zmienne opóźnienie dostaw, τ_p i τ_s oznaczają odpowiednio opóźnienia produkcyjne i spedycyjne, natomiast N jest długością horyzontu czasowego.

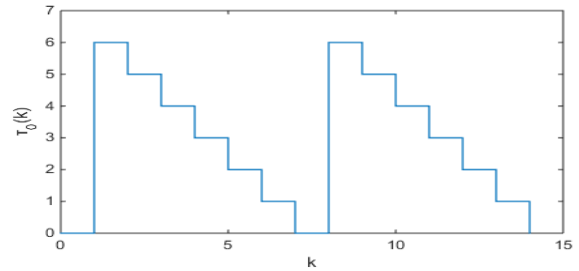
Przyjmując, że $k_6 = \mu$, a $k_7 = \nu$ zadanie optymalizacji wielokryterialnej przy spełnionych warunkach $k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, k_3 \geq 0, k_4 \geq 0, k_5 \geq 0, k_6 \geq 0, k_7 \geq 0$ można przedstawić następująco:

$$\min_{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7} [j_1, j_2] \quad (14)$$

Z powyższego wzoru wynika, że zadaniem przeprowadzanej optymalizacji jest znalezienie takich wartości $k_1 \dots k_7$, aby wskaźniki j_1, j_2 były jak najmniejsze.

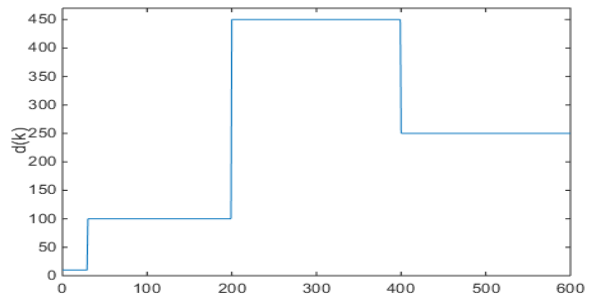
4. BADANIA SYMULACYJNE

Przedmiotem analizy jest przepływ towarów magazynowych, stan zapasów oraz wielkości dokonywanych zamówień. Badany układ charakteryzuje się periodycznym zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw przedstawionym na rys. 3. W czasie oczekiwania na transport zamówienia z poszczególnych dni są kumulowane, a następnie co siedem dni wysyłany jest cały towar. Wielkości realizowanych zamówień zależne są od bieżącego, zmiennego zapotrzebowania $d(k)$, zależności (6) oraz wskaźników jakości (12)-(14). Przyjęty podczas symulacji scenariusz wielkości popytu zilustrowany jest na rys. 4. Do badań przyjęto następujące wartości parametrów układu: $\tau_p = 7, \tau_s = 1, n_0 = 8, N = 600$ rząd aproksymacji $r=5$ oraz jednodniowy okres próbkowania.



Rys. 3 Zmienne w czasie opóźnienie dostaw

Celem badań symulacyjnych jest porównanie jakości działania regulatora R_1 , którego struktura została przedstawiona na rys. 2 z regulatorem całkowego rzędu R_2 , dla którego zmienne $k_6 = \mu$ oraz $k_7 = \nu$ są równe 1 oraz z regulatorem R_3 PD^u badanym w pracy [1], dla którego $k_5 = 0$. Do realizacji zadania optymalizacji wielokryterialnej (14) wykorzystano metodę SPEA2 (ang. Strength Pareto Evolutionary Algorithm), w której zadeklarowano rozmiar populacji 500 oraz liczbę generacji 100. SPEA2 jest jednym z algorytmów ewolucyjnych opartych na dominacji Pareto, w którym niezdominowane rozwiązania przechowywane są w zbiorze zewnętrznym. Każdy z przechowywanych chromosomów bierze udział w procesie selekcji. Redukcja liczebności zbioru realizowana jest przez klasteryzację. Wartość funkcji przystosowania wyznaczana jest na podstawie dominacji Pareto [2].



Rys. 4 Zapotrzebowanie rynku na produkty

W tabeli 1 przedstawione zostały wybrane rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej (14) i wartości odpowiadających wskaźników jakości (12)-(13). Zmienna M wskazuje na numer wybranego z populacji osobnika. Osobniki zostały dobrane tak, aby ich wartości funkcji celu (13) były zbliżone. Tabele 2 i 3 prezentują otrzymane wartości parametrów układu sterowania $k_1 \dots k_7$ dla tych samych co w tabeli 1 wybranych rozwiązań. W tabeli 3 nie rozstał uwzględniony regulator R_2 , ponieważ przy jego zastosowaniu dla każdego przypadku $\mu = \nu = 1$. Rys. 5 przedstawia front Pareto utworzony z 21 wybranych dla każdego regulatora niezdominowanych rozwiązań. Na rysunku zaznaczone są także trójki analizowanych wyników. Cyfra umieszczona obok każdej z trójek odpowiada liczbie porządkowej znajdującej się w każdej z tabel. Rozwiązanie o lp. 5 przekroczyło granicę prezentowanej na rys. 5 przestrzeni funkcji celu.

Tab. 1 Wartości wskaźników jakości dla wybranych rozwiązań niezdominowanych

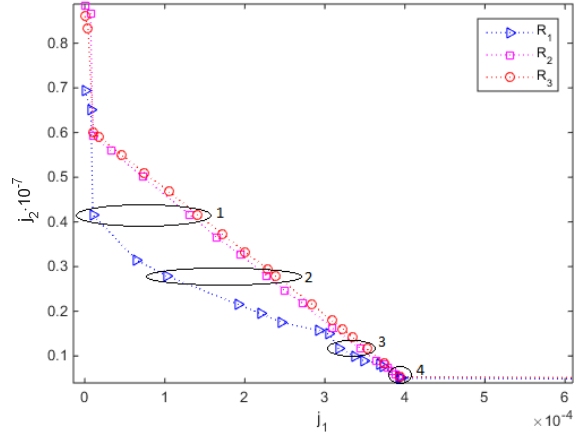
Lp.		1	2	3	4	5
R₁	M	3	9	29	126	219
	j₁·10⁻⁷	0,00001	0,0001	0,0003	0,0004	0,0021
	j₂·10⁻⁷	0,4161	0,2792	0,1162	0,0536	0,0379
R₂	N	126	218	331	403	429
	j₁·10⁻⁷	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0021
	j₂·10⁻⁷	0,4164	0,2797	0,1165	0,0536	0,0379
R₃	N	139	240	378	442	459
	j₁·10⁻⁷	0,0001	0,0002	0,0004	0,0004	0,0021
	j₂·10⁻⁷	0,4168	0,2794	0,1161	0,0537	0,03837

Tab. 2 Wartości parametrów układu sterowania dla wybranych rozwiązań niezdominowanych

Lp.		M	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅
R₁	1	3	17,78	0,0003	1,602	0,1896	-1,875
	2	9	11,32	0,0006	1,013	0,1974	-3,227
	3	29	24,99	1,770	0,0746	0,0069	-8,698
	4	126	17,29	0,0111	0,0936	0,1985	-0,546
	5	219	15,79	0,0004	0,0008	0,1933	-0,405
R₂	1	126	3,162	0,6268	0,1725	0,0613	-2,191
	2	218	4,632	0,3873	1,042	0,0613	-1,694
	3	331	9,944	0,2330	0,0512	0,1906	-1,033
	4	403	5,283	0,4640	0,2374	0,1835	-0,4555
	5	429	9,068	0,1373	0,0016	0,1725	-0,1725
R₃	1	139	2,015	0,8886	0,3174	0,0213	0
	2	240	4,588	0,3788	0,1590	0,0306	0
	3	378	7,994	0,2339	0,0032	0,0939	0
	4	442	1,995	1,242	0,0346	0,1326	0
	5	459	2,043	0,7023	0,8065	0,0616	0

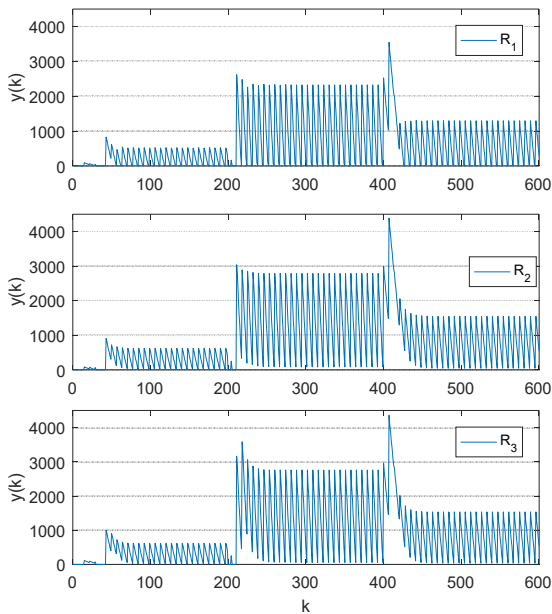
Tab. 3 Wartości parametrów niecałkowitego członu różniczkującego dla wybranych rozwiązań niezdominowanych

Lp.		M	k _{6=μ}	k _{7=v}
R₁	1	3	1,706	1,706
	2	9	1,195	1,316
	3	29	0,3625	0,2175
	4	126	1,961	1,002
	5	219	1,907	1,251
R₃	1	139	1,612	-
	2	240	0,2858	-
	3	378	0,7670	-
	4	442	1,094	-
	5	459	0,1302	-



Rys. 5 Front Pareto dla wybranych uzyskanych w wyniku optymalizacji rozwiązań niezdominowanych

Zaprezentowane wskaźniki jakości (12)-(13) są przeciwstawne, co oznacza, że w danym przypadku poprawienie jednego ze wskaźników wiąże się z pogorszeniem drugiego. Nie można całkowicie zminimalizować zapasów magazynowych bez spowodowania strat wynikających z braku towaru, co potwierdzają wyniki zgromadzone w tabeli 1. Jednak przedstawiony na rys. 5 front Pareto ukazuje, że zaproponowany w pracy regulator ułamkowego rzędu, którego strukturę ukazuje rys. 2, najlepiej poradził sobie z zadaniem optymalizacji. W przedstawionej powierzchni funkcji celu osiąga on widocznie korzystniejsze wartości j_1 oraz j_2 . Z tabeli 1 wynika, że uzyskał on lepsze wyniki niż inne badane regulatory w 80% szczególnie przebadanych przypadków. Różnica jest szczególnie okazała dla $j_2 \in \{0,1, 0,6\}$, co można zaobserwować na rys.5. Regulator całkowitego rzędu oraz regulator PD^μ na całym obszarze funkcji celu osiągają bardzo podobne wyniki, jednak minimalną dominację wykazuje regulator całkowity. Na rys. 6 ukazane są stany magazynowe uzyskane dla osobników o numerach przyporządkowanych do liczby porządkowej 4 znajdującej się w tabelach 1-3. Stany magazynów po zastosowaniu regulatorów R₂ oraz R₃ w danych momentach czasu są nawet o 17% większe w porównaniu do zajętości magazynu po zastosowaniu regulatora R₁. We wszystkich analizowanych przypadkach niewystarczająca ilość towaru w magazynie występuje tylko przy nagłych zmianach zapotrzebowania.



Rys. 6 Porównanie stanów zapasów magazynowych w funkcji czasu dyskretnego dla lp. 4

5. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy został rozpatrzony problem automatycznego sterowania zamówieniami w systemach magazynowych charakteryzujących się dużymi czasami opóźnień produkcyjnych oraz spedycyjnych. Głównym celem pracy było porównanie jakości działania zaproponowanego regulatora niecałkowitego rzędu o dwóch dodatkowych stopniach swobody μ oraz ν z regulatorem PD^μ oraz regulatorem całkowitego rzędu. Wykonane badania symulacyjne pokazały, że zaproponowany w pracy regulator PD^μ , PD^ν skutecznie dostosowuje wielkość zamówienia do zmieniającego się zapotrzebowania rynku, jednocześnie w skuteczny sposób ograniczając zajętość powierzchni magazynowej. Przejście, czyli braki towaru, występują jedynie w momentach nagłej zmiany zapotrzebowania. W pozostałym czasie magazyn jest w każdym cyklu opróżniany. Nowy regulator osiągnął korzystniejsze wartości wskaźników jakości w porównaniu do regulatorów całkowitego rzędu oraz PD^μ , które osiągnęły porównywalne rezultaty działania.

Literatura

1. Abrahamowicz E., Orłowski P.: Zastosowanie regulatora ułamkowego rzędu PD do automatycznego sterowania zamówieniami dla magazynu ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw. "Pomiary Automatyka Robotyka" 2016, nr 2, s. 5-10.
2. Baryła-Paśnik M., Piekarski W., Kuranc A., Piecak A., Ignaciuk S., Wawrzosek J.: Model optymalizacji tras przejazdowych jako narzędzie zmniejszania kosztów logistycznych. "Logistyka" 2015, nr 5, s. 41-46.
3. Busłowicz M.: Wybrane zagadnienia z zakresu liniowych ciągłych układów niecałkowitego rzędu. "Pomiary Automatyka i Robotyka" 2010, nr 2, s. 93-114.
4. Busłowicz M., Nartowicz T.: Projektowanie regulatora ułamkowego rzędu dla określonej klasy obiektów z opóźnieniem. "Pomiary Automatyka Robotyka" 2009, nr 2, s. 398-405.
5. Chołodowicz E., Orłowski P.: A periodic inventory control system with adaptive reference stock level for long supply delay. "Pomiary Automatyka Kontrolna" 2015, nr 12, s. 568-572.
6. Chołodowicz E., Orłowski P.: Dynamiczny dyskretny model systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem. "Logistyka" 2015, nr 4, s. 31-35.
7. Chołodowicz E., Orłowski P.: Sterowanie przepływem towarów w magazynie z wykorzystaniem predyktora Smitha. "Pomiary Automatyka Robotyka" 2015, nr 3, s. 55-60.
8. Coyle J., Bardi E. J., Langley Jr. C.J.: Zarządzanie logistyczne. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2010. ISBN 978-83-208-1864-2.
9. Cyplik P.: Przegląd metod sterowania zapasami. "Logistyka" 2003, nr 1, s. 23-27.
10. Grabowska J.: Model systemu informacji logistycznej w kanałach dystrybucji węgla kamiennego. Rozprawa doktorska. Zabrze: Politechnika Śląska, Wydział Organizacji i Zarządzania, 2012.
11. Hamamci S. E.: An algorithm for stabilization of fractional-order time delay systems using fractional-order PID controllers. "IEEE Trans. on Automatic Control" 2007, Vol. 52, p. 1964-1969.
12. 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 Science" 2011, No. 1 Vol. 59, p. 39-49.

13. Ignaciuk P., Bartoszewicz A.: LQ Optimal Sliding Mode Supply Policy for Periodic Review Inventory System. "IEEE Transactions On Automatic Control" 2010, No. 1, Vol. 55, p. 269-274.
14. Ignaciuk P., Bartoszewicz A.: Modelowanie procesów logistycznych w przestrzeni stanu. "Logistyka" 2010, nr 2.
15. Jakowska-Suwalska K., Sojda A., Wolny M.: Wielokryterialne sterowanie zapasami jako element wspomaganie planowania potrzeb materiałowych. "Zarządzanie i Edukacja" 2011, Vol. 96, s. 271-280.
16. Jurczyk K.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia wspomagającego zarządzanie zapasami i planowanie popytu na przykładzie przedsiębiorstwa dystrybucyjnego. "Logistyka" 2011, nr 2, s. 233-244.
17. Kaczorek T.: Wybrane zagadnienia teorii układów niecałkowitego rzędu. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2009.
18. Podlubny I.: Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications, "Academic Press", San Diego, 1998, Vol. 198.
19. Porada R., Gulczyński A.: Sterowanie energoelektronicznym źródłem napięcia z zastosowaniem regulatorów ułamkowych. "Electrical Engineering" 2014, Vol. 78, s. 201-207.
20. Rudnik, K., Franczok K.: Usprawnienie przepływu materiałów w magazynie na przykładzie sterowania rozmytego. "Logistyka" 2014, nr 4.
21. Sarjusz-Wolski Z.: Sterowanie zapasami w przedsiębiorstwie. Warszawa: PWE, 2000. ISBN 83-208-1272-0.
22. Sobolewski A., Ruszewski A.: Realizacja praktyczna regulatora niecałkowitego rzędu. "Pomiary Automatyka Robotyka" 2011, nr 2, s. 586-594.



Artykuł dostępny na podstawie licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0 Polska.
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl>