

# Badanie wpływu filtracji sygnału zapotrzebowania na jakość sterowania w systemie automatycznej regulacji wielkości zamówień dla magazynu ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw

**Streszczenie.** Poniższa praca przedstawia propozycję zastosowania filtracji ułamkowego rzędu sygnału określającego wielkość aktualnego zapotrzebowania klientów na produkt. Rozpatrywany model magazynu charakteryzuje się relatywnie dużym oraz zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw. System sterowania został oparty na strukturze regulacji w sprzężeniu w przód i sprzężeniu zwrotnym. W pracy zostały porównane filtry całkowitego i niecałkowitego rzędu. Parametry filtrów oraz układu regulacji wyznaczone zostały z wykorzystaniem metod optymalizacji wielokryterialnej SPEA2. Wpływ poszczególnych filtrów na jakość układu sterowania został porównany na podstawie wskaźników określających utracone korzyści oraz zajętość powierzchni magazynowej.

**Abstract.** This paper presents proposal of using fractional order filtering of the consumer demand. Considered inventory system with variable time delay uses a feedback-feedforward control system. The paper describes integer and fractional order filters. The parameters of the filters and control system are determined using multi-objective optimisation algorithm SPEA2. The simulations results are shown and compared using two quality indicators. (Study of the influence of filtering the demand signal on the control quality for automatic orders control system for a warehouse with variable time delay)

**Słowa kluczowe:** filtracja cyfrowa, system magazynowy, optymalizacja wielokryterialna, filtr niecałkowitego rzędu.

**Keywords:** digital filtering, inventory system, multi-criteria optimisation, fractional order filter.

## Wstęp

W dzisiejszej dobie powszechnej automatyzacji dąży się do stworzenia inteligentnych budynków, w tym także inteligentnych magazynów. Inteligentny magazyn ma na celu sprostać rosnącej dynamice procesów oraz zmaksymalizować efektywność zarządzania zasobami [1]. Działanie łańcucha dostaw jest napędzane popytem klientów, który w realnych warunkach nie jest stały, a opóźnienie dostaw jest zmienne [2]. Zamysłem powstania automatycznych systemów sterowania zamówieniami jest optymalne zaspokojenie potrzeb klienta przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów magazynowych [3],[4].

W realnych systemach zamówień uzupełniających każdy z dostarczanych do systemu sygnałów jest zaszumiony, co oznacza, że oprócz składowej zdeterminowanej, która zawiera użyteczną informację, zawiera także składową losową. Zakłócenia odbieranych informacji powstają na różnych etapach działań łańcucha dostaw. Często są one spowodowane przez aberrację przepływu informacji, co może wynikać z błędów ludzkich, błędnych procedur czy niekorzystnego systemu autoryzującego zamówienia klientów. Głównym sygnałem wejściowym do systemów automatycznego generowania zamówień jest popyt, którego niejednoznaczność wynika z losowości zachowań klientów. Stosowana w dzisiejszych przedsiębiorstwach strategia niskich kosztów, poprzez zmniejszanie zapasów buforowych, sprawia, że sieci logistyczne stają się coraz bardziej wrażliwe na zakłócenia, co stwarza konieczność filtracji sygnałów wejściowych [5]- [7].

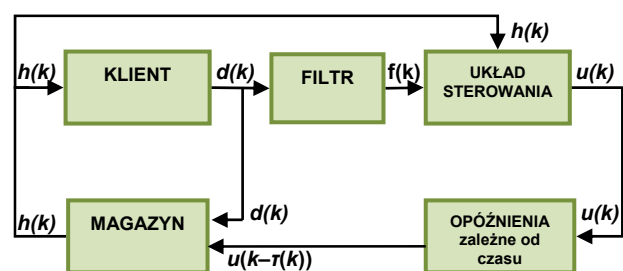
Rachunek różniczkowo-całkowy niecałkowitego rzędu powstał w XVII wieku. Jego główny rozwój przypada na wiek XIX, natomiast jego pierwsze praktyczne zastosowanie zostało odnotowane w XX wieku. Od tego czasu owa gałąź teorii sterowania nie przestaje się rozwijać. W automatyce często wykorzystuje się regulatory niecałkowitych rzędów, których przykłady zastosowań przedstawione zostały w pracach [8]-[14]. Rachunek różniczkowo-całkowy ułamkowego rzędu można wykorzystać także przy projektowaniu filtrów czego dowodzą prace [15]-[20].

Celem niniejszego artykułu jest zaprojektowanie oraz implementacja filtrów ułamkowego rzędu oraz porównanie

jakości ich działania z filtrami rzędów całkowitych w problemie sterowania wielkością zamówień dla systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw. Owe filtry mają za zadanie odseparować sygnał użyteczny od szumu w sygnale wejściowym do regulatora, który określa aktualną wielkość popytu. Jakość ich działania określana będzie na podstawie założeń strategii niskich kosztów, czyli minimalizacji przestoju pracy przy jednoczesnym ograniczaniu zajętości powierzchni magazynowej.

## Model matematyczny

Niniejsza praca opiera się na modelu matematycznym magazynu przedstawionym w pracach [21], [22], [8], [9]. Schemat struktury rozpatrywanego systemu magazynowego wraz z układem sterowania przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Struktura analizowanego systemu

W przedstawionej strukturze zmienna  $d(k)$  jest zmienną wejściową do magazynu oznaczającą zapotrzebowanie na produkt, które kreowane jest bezpośrednio przez klienta. Sygnał  $f(k)$  tworzony jest poprzez filtrację sygnału określającego zapotrzebowanie i jest informacją przekazywaną bezpośrednio do układu sterowania. Zmienna  $h(k)$  określa ilość sprzedanego towaru w chwili  $k$ . Powyższe zmienne są dyskretnymi funkcjami czasu, a  $d(k)$  oraz  $h(k)$  spełniają zależność:

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

Przy prowadzonej strategii niskich kosztów najkorzystniejsza jest sytuacja, gdy  $h(k)=d(k)$  przy jednoczesnej minimalizacji  $y(k)$ , czyli zachowaniu jak najmniejszego stanu magazynowego. Aktualna ilość zapasów magazynowych  $y(k)$  musi spełniać następujące uwarunkowanie:

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

Jeśli w chwili  $k$  zapotrzebowanie przewyższa ilość produktów wysłanych z magazynu ponoszone są straty wynikające ze spadku jakości obsługi klienta oraz utraconych korzyści.

W związku z występującym w przyjętym modelu zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw, wprowadzony został współczynnik określający stan wysyłki w chwili czasu  $k$ :

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

Ostatecznie, przy spełnionych założeniach  $x(k) \geq 0$ ,  $u(k) \geq 0$ , dyskretny dynamiczny model matematyczny określający odpowiednio ilość produktów oczekujących na wysyłkę do magazynu oraz jego aktualny stan można przedstawić w następujący sposób:

$$(4) \begin{cases} x(k) = q(k-1)x(k-1) + u(k - \tau_p) \\ y(k) = y(k-1) + (1 - q(k - \tau_s))x(k - \tau_s) - h(k) \end{cases}$$

gdzie:  $u(k)$  określa ilość zamówionych w chwili  $k$  produktów, natomiast  $\tau_s$ ,  $\tau_p$  oznaczają opóźnienia spedycyjne i produkcyjne.

#### Układ sterowania

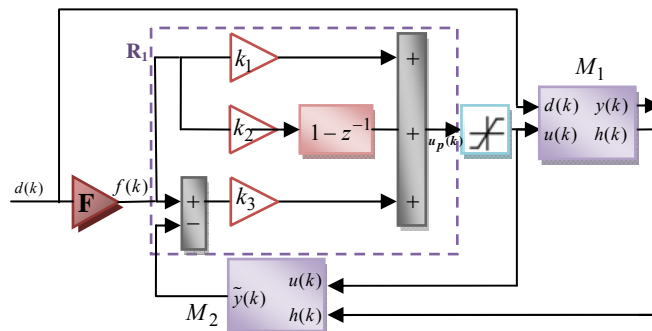
Struktura stosowanego w pracy układu sterowania zamówieniami w magazynie przedstawiona została na rysunku 2. Podstawową zmienną wchodzącą do układu jest zapotrzebowanie  $d(k)$ . Zostaje ono podane do bloku  $M_1$  – sterowanego obiektu reprezentowanego za pomocą modelu systemu magazynowego (4) oraz do filtra  $F$  typu IIR, którego sygnał wyjściowy  $f(k)$  przekazywany jest do układu regulacji  $R_1$ . Układ regulacji  $R_1$  składa się z dwóch regulatorów: z regulatora PD pracującego w sprzężeniu w przód zawierającego zmienne  $k_1, k_2$  oraz regulatora proporcjonalnego  $k_3$  pracującego w sprzężeniu w tył. Regulator proporcjonalno-różniczkujący dostosowuje wielkość zamówienia do bieżącego zapotrzebowania, natomiast regulator pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego zmniejsza uchyb regulacji. Sygnałem wyjściowym z układu regulacji jest dyskretna, pomocnicza zmienna  $u_p(k)$ . Na skutek poddania owej zmiennej procesowi saturacji uzyskuje się sygnał  $u(k)$ . Widoczny na schemacie blok  $M_2$  pełni rolę uproszczonego modelu magazynu bez opóźnienia, który zapobiega destabilizacji pracy układu poprzez predykcję stanów magazynowych. Model  $M_2$  przyjmuje następującą postać:

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

Stosowany w układzie filtr IIR niecałkowitego rzędu  $F$  służy do separacji użytecznego sygnału zapotrzebowania od szumu. Jego dyskretną transmitancję przedstawia funkcja przejścia:

$$(6) F(z^{-1}) \approx \left[ \frac{1}{k_4 + \frac{k_5}{T^\mu} \left( 1 + \sum_{j=1}^r p_j z^{-j} \right)} \right]^n$$

gdzie:  $k_4$  i  $k_5$  są wzmocnieniami odpowiednio części proporcjonalnej i różniczkującej,  $\mu$  jest dodatkowym stopniem swobody akcji różniczkującej, natomiast zmienna  $n \in \mathbb{N}$  określa ilość członów, z których składa się filtr – w niniejszej pracy  $n \in \{1, 2\}$ . Warto zauważyć, że gdy  $\mu=1$   $F$  staje się zwyczajnym filtrem IIR całkowego rzędu.



Rys.2. Schemat blokowy układu sterowania zamówieniami w magazynie

Postać filtra reprezentowana przez (6) została uzyskana na podstawie procesu dyskretyzacji filtra ciągłego, z wykorzystaniem dyskretnego aproksymacji metodą Eulera. Funkcję przejścia owego filtra w postaci analogowej przedstawia zależność:

$$(7) F(s) = \left( \frac{1}{k_4 + k_5 s^\mu} \right)^n, \mu > 0$$

Do realizacji operatora różniczkowania niecałkowitego rzędu  $s^\mu$  wyznaczone zostało jego dyskretnie przybliżenie:

$$(8) s^\mu \approx \left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)^\mu$$

gdzie:  $T$  oznacza okres impulsowania, natomiast  $z^{-1}$  pełni rolę operatora opóźniającego o jeden takt. W celu uzyskania wymiernej transmitancji operatorowej wykorzystuje się rozwinięcie powyższego operatora w szereg wykładniczy:

$$(9) \left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)^\mu \approx \frac{1}{T^\mu} \left( 1 + \sum_{j=1}^r p_j z^{-j} \right)$$

gdzie  $r$  oznacza rząd aproksymacji oraz:

$$(10) p_j(\mu) = \prod_{i=1}^j \left( 1 - \frac{\mu + 1}{i} \right)$$

Z uwagi na nieskończoną długość szeregu potęgowego dokładne odwzorowanie transmitancji (6) nie jest możliwe. W pracy przyjęto rząd aproksymacji  $r=5$ , co pozwala ograniczyć złożoność obliczeniową. W rozpatrywanym przypadku zwiększenie rzędu aproksymacji nie wpływa na zmianę otrzymanych wyników, co zostało sprawdzone podczas realizacji badań.

#### Kryteria oceny jakości sterowania

W niniejszej pracy jako kryterium jakości przyjęto spełnienie założeń polityki niskich kosztów. Mianowicie układ sterowania ma utrzymywać możliwie najmniejszy poziom zapasów przy jednoczesnym niedopuszczeniu do powstania przestoju, czyli sytuacji, gdy  $d(k) > h(k)$ .

Powyższa sytuacja prowadzi do obniżenia jakości obsługi klienta oraz utracenia korzyści finansowych.

Na podstawie przedstawionych założeń przyjęto następujące wskaźniki jakości:

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

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

gdzie:  $j_1$  reprezentuje utracone korzyści,  $j_2$  określa zajętość powierzchni magazynowej,  $N$  stanowi o długości horyzontu czasowego, natomiast  $n_0$  jest sumą opóźnień występujących w układzie sterowania dla:

$$(12) \quad k = 0 : n_0 = \tau_p + \tau_0(\tau_p) + \tau_s$$

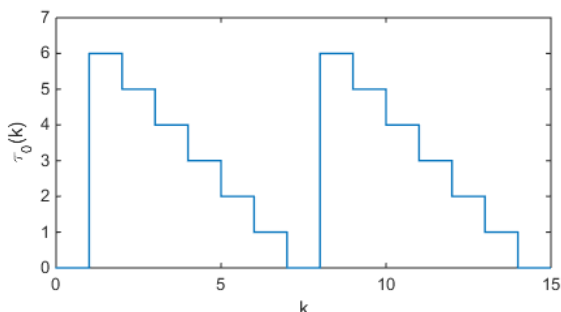
przy czym  $\tau_p$  oznacza opóźnienia produkcyjne,  $\tau_s$  opóźnienia spedycyjne, zaś  $\tau_0$  to periodycznie zmienne opóźnienie dostaw.

Na podstawie powyższych wskaźników jakości, przy spełnionych założeniach  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 \geq 0$  zadanie optymalizacji wielokryterialnej przyjmuje postać:

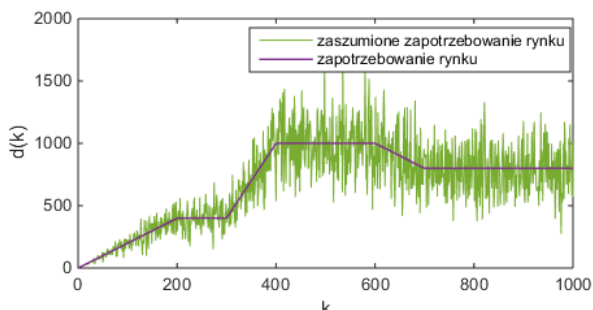
$$(13) \quad \min_{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \mu} [j_1, j_2]$$

### Badania symulacyjne

Przedmiotem przeprowadzonych badań symulacyjnych przepływu towarów w magazynie jest porównanie efektywności sterowania systemem zamówień uzupełniających w świetle przyjętych kryteriów (11). Do symulacji wykorzystany został dyskretny, niestacjonarny, liniowy model układu magazynowego z periodycznie zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw przedstawionym na rysunku 3. Pomiędzy dostawami zamówienia z poszczególnych dni są kumulowane i wysyłane cyklicznie co siedem dni.



Rys.3. Periodycznie zmienne w czasie opóźnienie dostaw



Rys.4. Scenariusz zmian zapotrzebowania na produkty

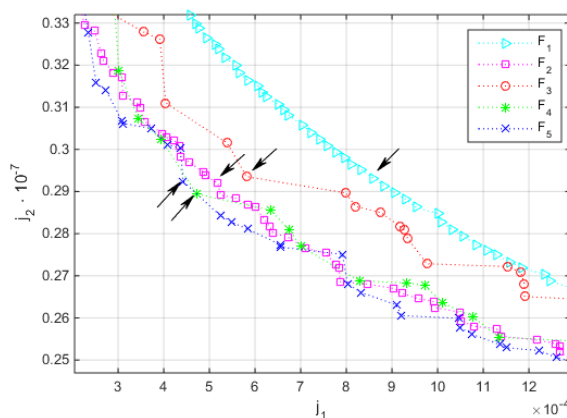
Rysunek 2 przedstawia zastosowany w modelu układ sterowania, natomiast zależności (1),(2) ukazują ograniczenia zawartych w nim sygnałów. Wielkość realizowanych przez układ sterowania zamówień zależy od aktualnego stanu zapotrzebowania  $d(k)$ , zależności (5) oraz wskaźników jakości (11). Przyjęty w pracy

scenariusz zmian popytu ilustruje rysunek 4. Parametry układu podczas symulacji przyjmują następujące wartości:  $\tau_p=7, \tau_s=1, n_0=15, N=1000, r=5$ . Okres próbkowania wynosi jeden dzień.

Przeprowadzone badania symulacyjne mają na celu określenie wpływu zastosowania filtru na jakość regulacji oraz porównanie skuteczności działania filtrów  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$ , gdzie  $F_1$  jest obiektem statycznym o wzmacnieniu  $K_p$ , natomiast transmitancje filtrów  $F_2 - F_5$ , wyznaczone zostały na podstawie (7), a przyjęte dla nich wartości zmiennych  $\mu$ ,  $n$  przedstawione są w tabeli 1. Realizacja powyższego zadania sprowadza się do wykonania optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniem metody SPEA2, która prowadzi do wygenerowania frontu Pareto przedstawiającego wartości funkcji przystosowania dla uzyskanych rozwiązań. Przedział poszukiwań zmiennej  $\mu$  dla filtru  $F_2$  został rozszerzony do przedziału (0,2), ponieważ w przypadku zastosowania ograniczenia (0,1) zmienna  $\mu$  dążyła do wartości 1, a filtr  $F_2$  uzyskiwał wyniki bardzo zbliżone do filtru  $F_3$ . W pracy przyjęto, że popyt na produkt nie jest dokładnie znany, dlatego zapotrzebowanie rynku zostało zakłócone sumem multiplikatywnym o wariancji wynoszącej 0,05. Zasmuowane  $d(k)$  zostało zilustrowane na rysunku 4.

Tabela 1. Parametry filtrów

Nazwa filtru	$n$	$\mu$
$F_2$	1	(0,2)
$F_3$	1	1
$F_4$	2	1
$F_5$	2	(0,1)



Rys.5. Front Pareto wybranych rozwiązań niezdominowanych

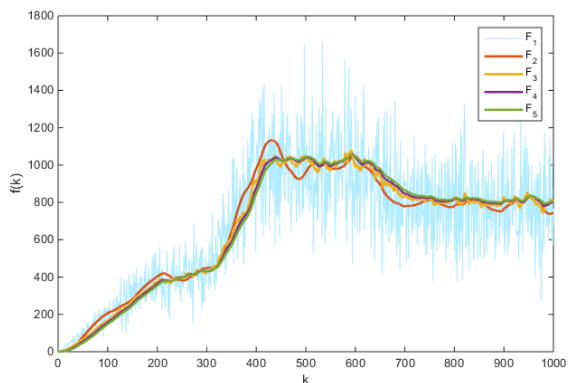
Rysunek 5 przedstawia fragment frontu Pareto uzyskanego w wyniku optymalizacji wielokryterialnej (13). Wartości funkcji przystosowania zaznaczonych na nim osobników zawarte zostały w tabeli 2. Tabela 3 przedstawia otrzymane wartości parametrów filtrów oraz parametry układu sterowania dla tych samych wybranych rozwiązań niezdominowanych. Osobniki zostały wybrane tak, aby ich wartości wskaźnika jakości  $j_2$  były możliwie zbliżone. Na podstawie analizy danych zawartych w tabelach oraz rysunku 5 można stwierdzić, że na całym przedstawionym obszarze funkcji celu najgorsze wyniki uzyskuje obiekt statyczny  $F_1$ . W analizowanym przypadku jego wartość wskaźnika jakości  $j_1$  jest o 93% większa w porównaniu do wskaźnika uzyskanego przez filtr  $F_5$ , dla zbliżonej wartości wskaźnika  $j_2$ . Na przedstawionym froncie Pareto  $F_5$  uzyskuje nieznaczną dominację nad filtrami  $F_2$  oraz  $F_4$ , które uzyskują porównywalne wyniki. Owa dominacja filtru  $F_5$  zwiększa się ponad dwukrotnie dla filtru  $F_3$ .

Tabela 2. Wartości wskaźników jakości dla wybranych rozwiązań niezdominowanych

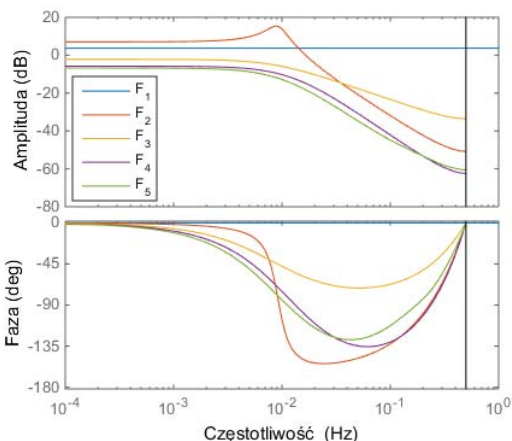
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
$j_1 \cdot 10^{-4}$	0,085	0,051	0,058	0,047	0,044
$j_2 \cdot 10^{-7}$	0,2932	0,2920	0,2935	0,2894	0,2924

Tabela 3. Wartości parametrów układu sterowania oraz filtrów dla wybranych rozwiązań niezdominowanych

	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$\mu$
$F_1$	1.398	0.0497	0.0888	1.528	-	-
$F_2$	4.870	33.02	0.8244	0.4895	96.37	1.848
$F_3$	1.820	49.92	0.0312	1.284	23.21	1
$F_4$	2.986	116.8	0.0394	1.397	217.49	1
$F_5$	2.979	131.9	0.0272	0.246	18.78	0.7845



Rys. 6. Przebiegi sygnałów wyjściowych z filtrów

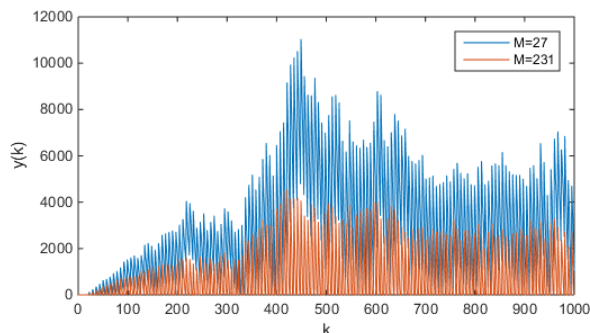


Rys. 7. Charakterystyki Bodego filtrów

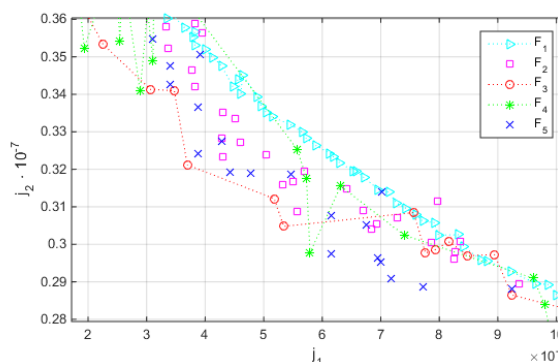
Sygnały wygenerowane na wyjściu filtrów zostały przedstawione na rysunku 6, podczas gdy charakterystyki amplitudowe i fazowe wybranych filtrów zostały pokazane na rysunku 7 (oś częstotliwości została znormalizowana). Najlepsze wygładzenie oraz praktycznie tożsame przebiegi uzyskały filtry  $F_4$  i  $F_5$ . Przebieg sygnału wyjściowego filtru  $F_4$  do momentu  $k=452$  charakteryzuje się szybszą reakcją na zmiany, po czym przewagę uzyskuje  $F_5$ . W przebiegu sygnału  $f(k)$  uzyskanego przez filtrację filtrem  $F_3$  nadal widoczna jest składowa losowa sygnału  $d(k)$ , natomiast na sygnale uzyskanym po przejściu przez filtr  $F_2$  widoczne są stosunkowo duże wahania zapotrzebowania.

Rysunek 8 ilustruje stany magazynu uzyskane w rezultacie działania systemu automatycznego generowania zamówień. Oba uzyskane przebiegi zostały wygenerowane na podstawie wyników uzyskanych przez filtr  $F_5$  dla 27 oraz 231 osobnika populacji. Wartości kryterium jakości (11) dla  $M=27$  zostały przedstawione w tabeli 2, natomiast dla  $M=231$  wynoszą one:  $j_1 \cdot 10^{-4} = 0,0082$ ,  $j_2 \cdot 10^{-7} = 0,1597$ . Z

rysunku 8 widać, że poprawienie jednego ze wskaźników  $j_1$ ,  $j_2$  wiąże się z pogorszeniem drugiego. Jeżeli ilość zapasów magazynowych będzie niewystarczająca, powstawać będą przestoje, które generują straty, natomiast duża dostępna ilość towaru oznacza wzrost kosztów związanych z magazynowaniem.

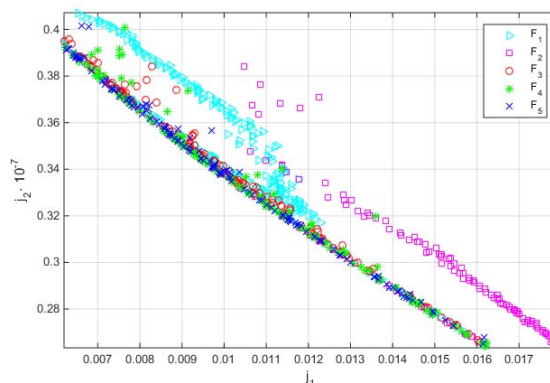


Rys. 8. Porównanie stanów zapasów magazynowych dla dwóch rozwiązań zadania optymalizacji dla filtru  $F_5$



Rys. 9 Wykres w przestrzeni funkcji celu wybranych rozwiązań niezdominowanych uzyskanych dla układu ze zmienionym zaszumieniem sygnału  $d(k)$

W drugiej części analizy dokonano badań symulacyjnych układu ze zmienionym zaszumieniem sygnału  $d(k)$ . Mianowicie zmienione zostało ziarno pseudolosowe (ang. seed), czyli wartość startowa generacji liczb pseudolosowych. Do symulacji wykorzystano wartości parametrów filtru oraz parametrów układu sterowania wyznaczone podczas pierwszej części badań symulacyjnych. Rysunek 9 prezentuje fragment uzyskanego frontu Pareto, gdzie widoczne jest, że filtr  $F_5$  w 60% przedstawionego zakresu  $j_1$  stracił swoją dominację w stosunku do filtru  $F_3$ , jednak nadal jakość jego działania pozostaje porównywalna do filtrów  $F_2$  oraz  $F_4$ . Obiekt statyczny  $F_1$  wciąż w znacznej części przedstawionego obszaru funkcji celu osiąga najgorsze wskaźniki jakości (11).



Rys. 10 Wykres w przestrzeni funkcji celu wybranych rozwiązań niezdominowanych uzyskanych dla układu z  $\tau_p=14$

Podobnie jak w drugiej części analizy, front Pareto zaprezentowany na rysunku 10 został uzyskany na podstawie pierwotnie otrzymanych wartości parametrów  $k_1$ - $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$ . W układzie zmieniono natomiast wartość opóźnień produkcyjnych na  $\tau_p=14$ . Na przedstawionym wykresie widoczne jest, że dla wartości wskaźnika  $j_1 < 0,0115$  filtry  $F_2$ - $F_5$  osiągają zbliżoną przewagę nad obiektem  $F_1$ , z wyjątkiem pojedynczych wybranych rozwiązań, szczególnie dla filtru  $F_2$ , natomiast dla  $j_1 > 0,0115$  znacząco spada jakość działania filtru  $F_2$ .

## Podsumowanie

W pracy zbadany został wpływ filtracji sygnału zapotrzebowania na jakość sterowania wielkością zamówień w systemie magazynowym ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw. Badania wykazały, że filtracja zaszumionego sygnału  $d(k)$  korzystnie oddziałuje na minimalizację wskaźników jakości (11). We wszystkich analizowanych przypadkach najgorsze wyniki osiągnął obiekt statyczny  $F_1$ . Filtry  $F_4$ ,  $F_5$  osiągnęły najlepsze, bardzo zbliżone wyniki, jednak minimalną dominację wykazuje filtr  $F_5$  ułamkowego rzędu. Oba powyższe filtry wykazały się dobrą odpornością na zmiany zaszumienia oraz zmianę opóźnienia produkcyjnego w układzie. Cecha ta jest bardzo ważna w realnych systemach magazynowych, gdzie sytuacje losowe wymuszają konieczność dostosowania się układu do nowych warunków pracy. Filtr  $F_3$  także wykazał się dobrą odpornością na powyższe zmiany, jednak jego jakość sterowania w układzie podstawowym była przeciętna. Podczas analizy filtr  $F_2$  okazał się wrażliwy na zmiany opóźnień produkcyjnych. Badania symulacyjne pokazały, że rozwiązanie zadania optymalizacji wielokryterialnej (13) sprowadza się do poszukiwania kompromisu pomiędzy jakością obsługi klienta, czyli niedopuszczeniem do braków w zaopatrzeniu, a kosztami związanymi z zajętością powierzchni magazynu. W przedstawionych w pracy najlepszych uzyskanych rozwiązaniach system dopuszcza do powstawania przestoju jedynie chwilowo, w sytuacjach nagłego wzrostu popytu na produkt. Kompromis pomiędzy wskaźnikami jakości  $j_1$ ,  $j_2$  został osiągnięty w zadowalającym stopniu.

Autorzy

Ewa ABRAHAMOWICZ, Przemysław ORŁOWSKI<sup>1</sup>  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,  
Katedra Sterowania i Pomiarów (1)  
eabrahamowicz@onet.pl

## LITERATURA

- [1] Korzeń Z., Inteligentne magazyny- logistyczne uwarunkowania integracji systemów, *Polski Kongres Logistyczny. LOGISTICS 2000*, (2000)
- [2] Rutkowski K., Zarządzanie łańcuchem dostaw- próba sprecyzowania terminu i określenie związków z logistyką, *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, 12 (2004)
- [3] Cudziło M., Wybrane problemy decyzyjne w zarządzaniu procesami logistycznymi, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i zarządzanie*, 61 (2013), 5-18
- [4] Ignaciuk P., Bartoszewicz A., Modelowanie procesów logistycznych w przestrzeni stanu, *Logistyka*, 2 (2010)
- [5] Kramarz M., Kramarz W., Analiza zakłóceń w wybranym ogniwie łańcucha dostaw branży motoryzacyjnej, *Logistyka*, 4 (2012), 435-442
- [6] Pieleś S., Analiza zakłóceń w przepływach logistycznych przedsiębiorstwa produkcyjnego- studium przypadku, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 2015, 379-394
- [7] Monieta J., Redukcja zakłóceń wybranych sygnałów pomiarowych statków morskich, *Biuletyn WAT*, 3 (2014), 91-102
- [8] Abrahamowicz E., Orłowski P., Zastosowanie regulatora ułamkowego rzędu PD do automatycznego sterowania zamówieniami dla magazynu ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 220 (2016), nr 2, 5-10
- [9] Abrahamowicz E., Orłowski P., Analiza porównawcza regulatorów niecałkowitego i całkowitego rzędu w zastosowaniu do dwukryterialnego problemu sterowania wielkością zamówień dla systemu magazynowego ze zmiennym w czasie opóźnieniem dostaw, *Modelowanie Inżynierskie*, 28 (2016), nr 59, 5-11
- [10] Das. S., Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls, *Springer-Verlag*, 2008
- [11] Kaczorek T., Selected Problems of Fractional Systems Theory, *Springer Science & Business Media*, 2011
- [12] Porada R., Gulczyński A., Sterowanie elektroelektronicznym źródłem napięcia z zastosowaniem regulatorów ułamkowych, *Electrical Engineering*, 2014, 201-207
- [13] Petras I., Fractional-order feedback control of a DC motor, *Journal of Electrical Engineering*, 60 (2009), nr 3, 117-128
- [14] Ostalczyk P., Duch P., Brzeziński D., Sankowski D., Order Functions Selection in the Variable-, Fractional-Order PID Controller, *Advanced in Modeling and Control of Non-integer-Order Systems. Springer International Publishing*, 2015, 159-170
- [15] Chen Y.Q., Vinagre B.M., Vinagre, A New IIR-type Digital fractional order differentiator, *Signal Processing*, 83(2003), 2359-2365
- [16] Tseng C.C., Design of fractional order Digital FIR differentiators, *IEEE Signal Processing Letters*, 8(2001), 77-79
- [17] Siwczyński M., Drwal A., Żaba S., Zastosowanie cyfrowych filtrów ułamkowego typu wykładniczego do analizy układów o parametrach rozłożonych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(2012), 184-190
- [18] Stanisławski R., Gałek M., Latawiec K. J., Łukaniszyn M., Modeling and identification of a fractional-order discrete-time Laguerre-Hammerstein system, *Progress in Systems Engineering: Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Systems Engineering, Springer*, 366(2014), 77
- [19] Dzieliński A., Sierociuk D., Ultracapacitor modelling and control using discrete fractional order state-space models and fractional kalman filters, *Control Conference (ECC), 2007 European. IEEE*, 2007, 2916-2922
- [20] Ostalczyk P., Fractional-order linear digital 1D and 2D filter response calculation using Matlab, *International Journal of Dynamics and Control*, 2016, 1-10
- [21] Chołodowicz E., Orłowski P. A periodic inventory control system with adaptive reference stock level for long supply delay, *Measurement Automation Monitoring*, 61(2015), no. 12, 568-572
- [22] Orłowski P., Analiza dwukryterialnego problemu optymalizacji w zastosowaniu do automatycznego sterowania systemem zamówień w magazynie z dużymi opóźnieniami dostaw z wykorzystaniem regulatora feedback-feedforward z predyktorem Smitha, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(2016), nr 10, 218-221