

Przemysław PIETRZAK
POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA

Koncepcja szybkiej filtracji sygnałów wagowych z wykorzystaniem filtrów parametrycznych

mgr inż. Przemysław PIETRZAK

Doktorant w Zakładzie Teorii Sterowania i Techniki Symulacyjnych Politechniki Szczecińskiej. Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrycznym PS – dyplom magistra inżyniera uzyskał w roku 2006.



e-mail: pietrzak@ps.pl

Streszczenie

Proces filtracji sygnałów pomiarowych występujących w systemach ważenia decyduje zarówno o dokładności ważenia jak i o czasie trwania procesu ważenia. Problem filtracji nabiera szczególnego znaczenia w szybkich wagach porcjujących. Urządzenia te wykonują od kilkunastu nawet do kilkudziesięciu ważeń na minutę. Skrócenie czasu trwania etapu ważenia poprzez przyspieszenie procesu filtracji, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności daje wymierną korzyść w postaci zwiększenia wydajności określonego urządzenia. W referacie przedstawiono budowę oraz zasadę działania automatycznej wagi porcjującej zgodnej z dyrektywą OIML R-61. Przeprowadzono analizę czasowo – częstotliwościową sygnałów zarejestrowanych w wagach porcjujących pracujących w warunkach przemysłowych. Zaproponowano metodę filtracji opartą na zastosowaniu parametrycznego filtra składowej stałej. Opisana metoda została poddana badaniom testowym w warunkach przemysłowych i znalazła zastosowanie w prototypowej wersji modułu wagowego Siwax FTA firmy Siemens.

Słowa kluczowe: Wagi i systemy ważenia, pomiar masy, filtracja sygnałów, przetwarzanie sygnałów.

The conception of fast filtration of weighing signals using parametric filters

Abstract

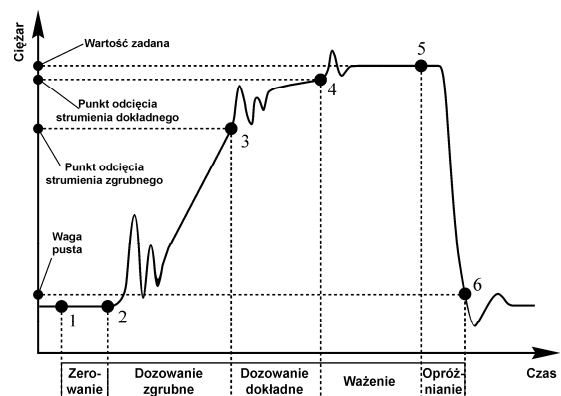
The filtration process of measurement signals, which occurs in weighing systems, decides to both the accuracy of measurement and the duration time of the weighing stage. The filtration problem gains the great meaning in fast filling machines. These scales perform from a dozen or so up to a few dozen weighings per minute. Shortening the duration time of the weighing stage through speeding up the filtration procedure and keeping the accuracy at the same time, give the improvement of the performance. In this paper a construction and principle of operation of Automatic Gravimetric Filling Instrument according to OIML R-61 is presented. The time and frequency analysis of signals, which were logged in industrial filling machines, has been carried out. The filtration method based on parametric constant component filter has been explained. Described method was tested in industrial conditions and it has been applied in the prototype version of Siwax FTA weighing module.

Keywords: Scales and weighing systems, mass measurements, signal filtration, signal processing .

1. Automatyczna waga porcjująca OIML R-61

Automatyczna waga porcjująca dozuje poszczególne porcje produktu w pojedynczym lub ciągłym cyklu pracy zgodnie z powtarzającym się schematem [1]. Głównym elementem

konstrukcji jest zbiornik zawieszony na ogniwach obciążnikowych. Zbiornik ten wraz z czujnikami pomiarowymi stanowi klasyczną stacjonarną wagę nieautomatyczną. Nad zbiornikiem umieszczone są elementy dozujące, natomiast w podstawie zbiornika wagi wmontowane są kłapy opróżniające. Przez proces ważenia rozumie się wykonanie przez wagę pełnego cyklu, który składa się z pięciu kolejno następujących po sobie etapów (rysunek 1 i 3): zerowania lub tarowania (1-2), dozowania (2-4), ważenia (4-5), doważania i opróżniania (5-6).



Rys. 1. Cykle pracy wagi porcjującej

Fig. 1. Operative cycles of the Automatic Gravimetric Filling Instrument

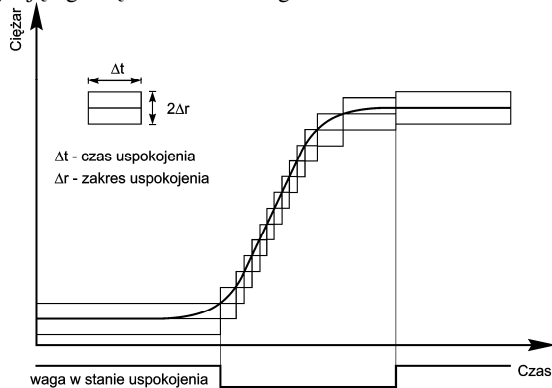
Etap doważania jest opcjonalny i może nastąpić tylko wtedy, gdy ważony ciężar jest poniżej dolnej granicy tolerancji. Dla zapewnienia większej dokładności etap dozowania prowadzony jest z dwoma różnymi prędkościami: zgrubną (szybszą) i dokładną (wolniejszą). Zmniejszenie prędkości dozowania przed jego zakończeniem umożliwia precyzyjniejsze odcięcie strumienia materiału, który napelnia zbiornik wagi, co w efekcie przekłada się na dokładność, z jaką wypracowywana jest wartość zadana.

1.1. Etapy zerowania i ważenia

W trakcie etapów zerowania i ważenia dokonuje się pomiaru masy zbiornika wagi (teoretycznie do wyznaczenia poprawnej wartości masy niezbędna jest znajomość przyspieszenia ziemskiego g w miejscu pomiaru, gdyż w zasadzie wagi wskazują siłę (ciężar) a nie masę. Są one jednak wywzorcowane w miejscu ich ustawiania w jednostkach masy i wtedy stosowanie poprawek uwzględniających przyspieszenie ziemskie jest zbędne). Różnica wyników to masa netto dozowanego produktu. Na podstawie wyniku pomiaru dostraja się nastawy modułu wagowego na kolejny cykl pracy. Jeśli wynik pomiaru znajduje się w granicy tolerancji, to kolejny cykl pracy będzie przebiegał z niezmiennymi nastawami, jeśli jednak odchyłka przekracza dopuszczalną granicę regulator przestroi parametry dozowania [2].

Pomiaru masy dokonuje się w tzw. stanie uspokojenia na podstawie odfiltrowanego sygnału wagowego, w oparciu o kryteria odcinkowe (rysunek 2). Jeśli w trakcie etapu zerowania bądź ważenia, przez zadany czas uspokojenia Δt odchyłka ciężaru nie przekroczy wartości zdefiniowanej jako zakres uspokojenia Δr , to sygnał pomiarowy występujący na wyjściu układu

filtrującego traktowany jest jako aktualny ciężar materiału znajdującego się w zbiorniku wagi.



Rys. 2. Stan uspokojenia w wadze porcjującej
Fig. 2. Stand-still state of the Automatic Gravimetric Filling Instrument

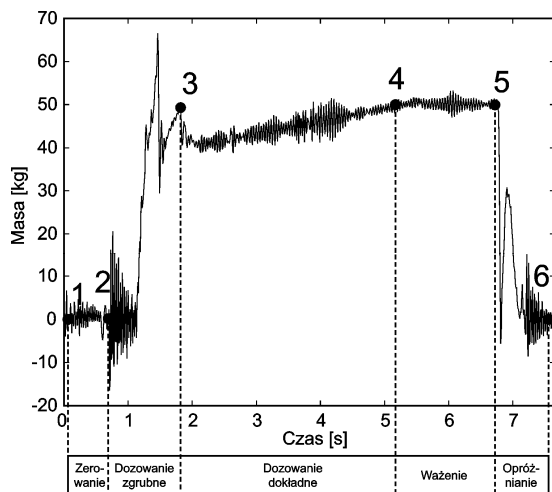
Inaczej mówiąc wartość sygnału w chwili, gdy spełnione zostanie kryterium uspokojenia traktowana jest, jako wynik pomiaru.

Poprzez zmianę parametrów Δt i Δr użytkownik może wpływać na wydajność urządzenia. Skrócenie czasu uspokojenia lub zwiększenie zakresu uspokojenia przekłada się na skrócenie czasu pomiaru, co w efekcie zwiększa wydajność urządzenia. Zabieg ten powoduje jednak zmniejszenie dokładności ważenia.

Warto zauważyć, że kluczowym dla zwiększenia wydajności urządzenia jest pomiar masy w etapie ważenia. Jest to związane z możliwością wykonywania zerowania co pewną określoną liczbę cykli, zgodnie z [1] nie rzadziej jednak niż co 15 min.

2. Charakterystyka zakłóceń występujących w wadze porcjującej

Na rysunku 3 przedstawiono niefiltrowany sygnał pomiarowy obejmujący pełen cykl pracy wagi porcjującej, zarejestrowany na wadze o obciążeniu znamionowym 50 kg, z widocznym wpływem zakłóceń.

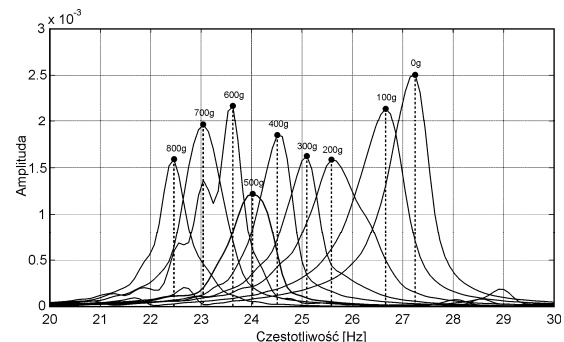


Rys. 3. Cykle pracy wagi porcjującej na podstawie sygnału niefiltrowanego
Fig. 3. Operative cycles of the Automatic Gravimetric Filling Instrument based on the raw signal

Istnieją trzy podstawowe źródła zakłóceń występujących w systemach ważenia, są to:

- drgania mechaniczne wynikające z istoty pomiaru masy przy użyciu ogniwo obciążnikowych
- zakłócenia wynikające z dynamiki procesu dozowania i opróżniania
- drgania mechaniczne powstałe poza układem pomiarowym.

Drgania mechaniczne wynikające z istoty pomiaru masy przy użyciu ogniwo obciążnikowych zdają się być najważniejszą przyczyną zakłóceń. Ogniwo obciążnikowe składa się z metalowej belki, na którą nakleja się zestaw tensometrów. Zasada pomiaru sprowadza się do sprężystego odkształcenia belki przetwornika pod wpływem działającej siły. Jest to przyczyną powstawania drgań swobodnych tłumionych. Zakładając, że waga jest liniowym układem mechanicznym o jednym stopniu swobody, można do opisu drgań własnych jej konstrukcji zastosować równanie tłumionego oscylatora harmonicznego. Podstawowym wnioskiem, jaki można wysnuć stosując powyższe równanie do opisu drgań jest fakt, iż częstotliwość drgań swobodnych tłumionych zależy od całkowitej masy zbiornika wagi a więc będzie ona inna podczas zerowania i inna w trakcie ważenia. Zależność ta została potwierdzona w trakcie eksperymentu jaki przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na wadze porcjującej o dopuszczalnym obciążeniu 800 g [4] (rysunek 4).



Rys. 4. Wpływ masy ważonego produktu na częstotliwość drgań własnych tłumionych
Fig. 4. The influence of weighing product's mass on the damped natural frequency

Dzięki uprzejmości firmy Siemens otrzymano do analizy kilkanaście przebiegów wagowych zarejestrowanych na wadze porcjującej pracujących w warunkach przemysłowych o dopuszczalnym obciążeniu od 1 do 1000 kg. Po wykonaniu analizy częstotliwościowej okazało się, iż częstotliwości drgań własnych przebadanych urządzeń mieszczą się w przedziale od 15 do 35 Hz dla nieobciążonego zbiornika (etap zerowania) oraz od 10 do 25 Hz przy obciążeniu znamionowym (etap ważenia). Trudno jest jednak powiązać prostą zależnością częstotliwości drgań własnych tłumionych danej wagi z wartością jej dopuszczalnego obciążenia. Wynika to z faktu stosowania różnej ilości ogniwo obciążnikowych, na których zawieszony jest zbiornik, a także z faktu, że różne typy ogniwo obciążnikowych cechują się różnymi współczynnikami sprężystości.

Także sam proces dozowania charakteryzuje się swoją dynamiką. Strumień materiału wpadając do zbiornika wagi z pewnej wysokości oddziałuje na wagę, co objawia się jako pewna zmienna w czasie siła, stanowiąca dynamiczne obciążenie wagi. Chociaż trudno mówić w tym przypadku o sygnale zakłócającym, to jednak zjawiska te utrudniają dokładny pomiar masy w trakcie etapu dozowania. Znaczącym w procesie dozowania jest to, że w przeciwieństwie do etapu zerowania, czy ważenia aktualna wartość odfiltrowanego sygnału pomiarowego nie odpowiada aktualnej wartości masy wagi.

Poza drganiami własnymi konstrukcji wagi można wyróżnić dodatkowo zakłócenia pochodzące z zewnętrznych źródeł, które przedstawiają się do układu pomiarowego poprzez sprzężenia mechaniczne w postaci wspólnych elementów konstrukcji wagi i jej otoczenia.

Rozpatrując cykl pracy wagi porcjującej można wymienić dwa główne zadania, jakie stoją przed układem filtrującym:

- pomiar masy w etapach ważenia i zerowania
- przygotowanie sygnału pomiarowego dla celów sterowania procesem dozowania i opróżniania.

W niniejszym artykule rozpatrzono jedynie problem filtracji sygnałów wagowych podczas pomiaru masy w etapach ważenia i

zerowania. W etapach tych w stanie ustalonym wartość średnia sygnału wagowego pozostaje stała i jest proporcjonalna do całkowitej masy układu jakim jest waga. Jak wiadomo częstotliwościowym odpowiednikiem operacji uśredniania jest proces filtracji dolnoprzepustowej, stąd używając filtrów dolnoprzepustowych w trakcie etapu ważenia i zerowania dokonuje się pomiaru masy.

3. Koncepcja uzmienniania parametrów w filtrach składowej stałej

Filtr dolnoprzepustowy n – tego rzędu, można opisać poprzez równanie różniczkowe n – tego rzędu o stałych współczynnikach postaci

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t) \quad (1)$$

Wszystkie współczynniki równania (1) można zapisać jako iloraz

$$a_i = \frac{b_i}{\omega_g^i} \quad (2)$$

gdzie wartości współczynników b_i decydują o wykorzystywanej metodzie aproksymacji charakterystyki częstotliwościowej, natomiast wielkość ω_g to inaczej pulsacja graniczna – parametr, który decyduje o szerokości pasma przepustowego. Uwzględniając (2) równanie (1) można zapisać jako

$$\frac{b_n}{\omega_g^n} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + \frac{b_1}{\omega_g} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t) \quad (3)$$

Rodzaj użytej aproksymacji charakterystyki amplitudowej oraz założenia dotyczące jej kształtu narzucają sztywne wartości współczynników b_i i ω_g równania (3). Ograniczenie to nie występuje jednak w przypadku filtrów składowej stałej (zwanych również filtrami uśredniającymi). Tutaj założenia co do kształtu charakterystyki amplitudowej układu nie są tak ostre, jak w przypadku filtrów dolnoprzepustowych. Wystarczy tylko, aby moduł charakterystyki przyjmował wartość jeden dla pulsacji równej zero, był niższy od jedności w paśmie przejściowym oraz gwarantował zakładane tłumienie w paśmie zaporowym

$$\left| K(j\omega) \right| \begin{cases} = 1 & \text{dla } \omega = 0 \\ \leq 1 & \text{dla } 0 < \omega < \Omega \\ \leq \alpha_\Omega & \text{dla } \omega \geq \Omega \end{cases} \quad (4)$$

gdzie Ω oznacza pulsację graniczną pasma zaporowego a α_Ω maksymalną wartość charakterystyki częstotliwościowej modułu na granicy i wewnątrz pasma zaporowego. Tak sformułowane wymagania dotyczące charakterystyki amplitudowej dają możliwość syntezy układów o różnych strukturach i różnych wartościach parametrów i co ważne nie wykluczają uzmienniania w czasie parametrów filtra, co jak zostało wykazane w [3] przyczynia się do skrócenia stanu nieustalonego występującego w układach filtrujących i w konsekwencji prowadzi do skrócenia czasu ustalania odpowiedzi układu filtrującego.

4. Parametryczny filtr składowej stałej

Koncepcja uzmienniania parametrów w analogowych filtrach dolnoprzepustowych została szczegółowo opisana w [3]. Dla celów filtracji sygnałów wagowych zaproponowano parametryczny filtr składowej stałej, zrealizowany w technice cyfrowej – poprzez dyskretyzację równania (3) metodą transformacji biliniowej. W analogowych filtrach parametrycznych rozpatrywanych w [3] w celu fizycznej realizowalności układu jako funkcje uzmienniające przyjęto odpowiedzi skokowe elementów oscylacyjnych drugiego rzędu. Technika cyfrowa nie nakłada już takich ograniczeń, w związku z tym w miejsce stałych współczynników a_n

równania (1) można przyjąć zmienne w czasie współczynniki, opisane równaniem

$$a_i(t) = \frac{b_i}{\omega_g^i(t)} \quad (5)$$

gdzie zmianie w czasie podlega jedynie wartość pulsacji granicznej filtra, natomiast współczynniki aproksymacyjne pozostają niezmiennione.

Jak to zostało wykazane w [3] układ filtra opisany przez równania (1) i (5) jest układem stabilnym asymptotycznie. Warunkiem koniecznym i wystarczającym stabilności jest, aby parametry układu stabilizowały się wraz z upływem czasu

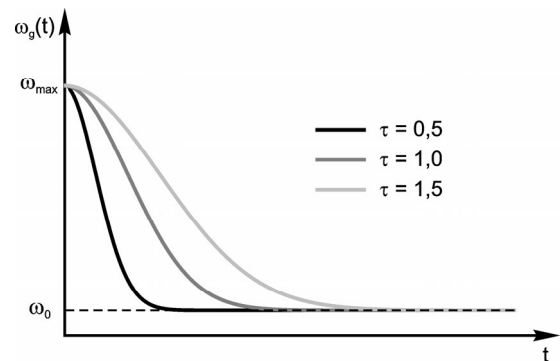
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega_g(t) = \omega_g \quad (6)$$

Spełnienie warunku 5 jest konieczne również ze względu na to, by układ spełniał zadania filtracyjne.

Funkcja uzmienniająca (7) jest rodzajem prostego algorytmu, który określa, jak zmieniać się będzie w czasie charakterystyka częstotliwościowa filtra. Ścisłe mówiąc definiuje ona zmiany parametru ω_g od momentu rozpoczęcia procedury uzmienniania. Parametr ω_0 oznacza podstawową częstotliwość graniczną filtra, ω_{max} częstotliwość początkową a τ jest stałą czasową określającą prędkość uzmienniania

$$\omega_g(t) = \omega_0 \left(1 + \frac{\omega_{max} - \omega_0}{\omega_0} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \right) \quad (7)$$

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji uzmienniającej dla trzech różnych wartości stałej czasowej. Dla $t = 0$ funkcja uzmienniająca przyjmuje wartość początkową ω_{max} i po czasie $t \approx 3\tau$ osiąga wartość ustaloną ω_0 .



Rys. 5. Wykres funkcji uzmienniającej
Fig. 5. The plot of the varying function

Procedura uzmienniania rozpoczyna się na początku etapu zerowania (punkt 1 na rysunku 1) lub ważenia (punkt 4 na rysunku 1), czyli w momencie, kiedy rozpoczynany jest pomiar masy.

Niech $\Delta\omega_0(t)$ oznacza odległość pomiędzy wartością funkcji uzmienniającej $\omega_g(t)$ w chwili t a podstawową częstotliwością graniczną filtra ω_0 tak jak w równaniu (8)

$$\Delta\omega_0(t) = \omega_g(t) - \omega_0 \quad (8)$$

wtedy na podstawie równania (7) można napisać

$$\Delta\omega_0(t) = (\omega_{max} - \omega_0) e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (9)$$

Wynika stąd, że chwilowa częstotliwość graniczna filtra ω_0^* w trakcie trwania procedury uzmienniającej wynosi

$$\omega_0^*(t) = \omega_0 + \Delta\omega_0(t) \quad (10)$$

co oznacza, że w trakcie trwania procedury uzmienniającej pasmo przepustowe filtra zostaje poszerzone poprzez przesunięcie podstawowej częstotliwości granicznej filtra o $\Delta\omega_0$.

5. Wyniki badań testowych przeprowadzonych w warunkach przemysłowych

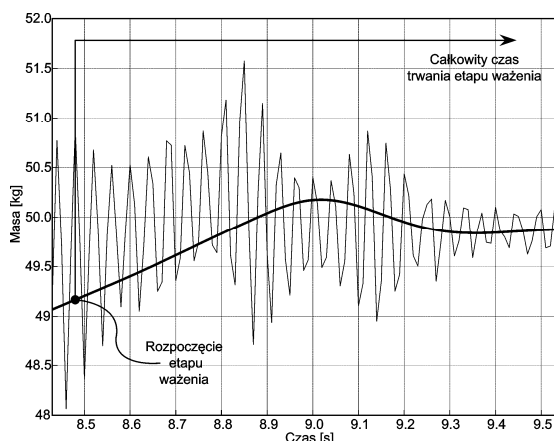
Występowanie zakłóceń powoduje konieczność stosowania układów filtrujących, które wnoszą w torze pomiarowym pewne opóźnienie zależne od szerokości pasma przepustowego filtra. Jak to zostało przedstawione w punkcie 1.1 całkowity czas trwania etapu ważenia i zerowania jest ściśle uzależniony od wartości kryterium uspokojenia tj.: czasu uspokojenia Δt i zakresu uspokojenia Δr . Weryfikację kryterium uspokojenia przeprowadza się na podstawie odfiltrowanego sygnału pomiarowego. Nie ma więc wątpliwości, iż parametry filtracji również wpływają na całkowity czas trwania etapu ważenia i zerowania.

W trakcie przeprowadzonych badań okazało się, iż uziemiając parametry filtra na początku etapu zerowania lub ważenia, tak jak to zostało opisane w punkcie 4 można znacznie przyspieszyć wypracowywanie składowej stałej i w efekcie skrócić całkowity czas trwania wymienionych etapów.

Ponieważ, jak to zostało zasygnalizowane w punkcie 2 częstotliwość drgań własnych tłumionych jest zależna od masy to dla etapów zerowania i ważenia należy użyć innych zestawów parametrów ω_{max} , ω_0 i τ . Uwzględniając warunki początkowe, można bez przeszkód dokonywać zmiany parametrów filtra w trakcie cyklu pracy wagi porcjującej.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odfiltrowane sygnały wagowe uzyskane przy użyciu klasycznego filtra dolnoprzepustowego i układu filtra parametrycznego. Jako sygnał testowy wykorzystano niefiltrowany sygnał pomiarowy zawierający etap ważenia, zarejestrowany na rzeczywistej wadze porcjującej, pracującej w warunkach przemysłowych. Częstotliwość drgań własnych tłumionych dla prezentowanego urządzenia wynosi 20 Hz dla etapu ważenia, kryteria uspokojenia wynosiły $\Delta t = 300$ ms oraz $\Delta r = 0,02$ kg, co odpowiada jednej działce elementarnej d wagi.

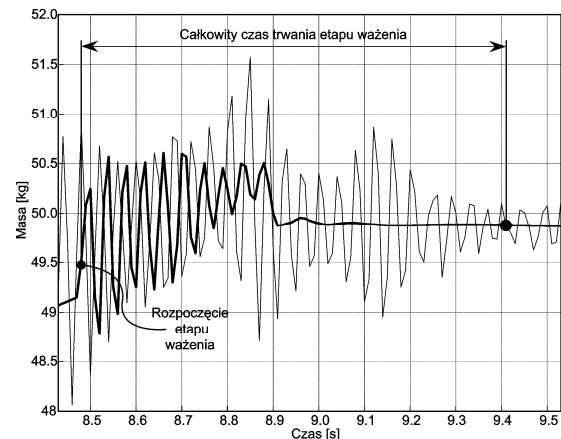
W prezentowanym przykładzie odfiltrowany wagowy sygnał pomiarowy, uzyskany przy pomocy filtra dolnoprzepustowego o tłumieniu krytycznym nie spełnia kryterium uspokojenia, po ponad 1 sekundzie od momentu rozpoczęcia etapu ważenia. W przypadku zastosowania filtra parametrycznego całkowity czas trwania etapu ważenia wynosi w przybliżeniu 0,9 sekundy.



Rys. 6. Odfiltrowany sygnał wagowy w etapie ważenia, uzyskany przy użyciu dolnoprzepustowego filtra o tłumieniu krytycznym, przy $\omega_k = 2\pi \cdot 2$ rad/s
Fig. 6. Filtered weighing signal obtained by dump critical low-pass filter with $\omega_k = 2\pi \cdot 2$ rad/s

Wpływ uziemiańczenia parametrów filtra jest wyraźnie widoczny na rysunku 6, w początkowej fazie etapu ważenia. Objawia się on, poprzez wzrost amplitudy sygnału zakłócającego, co jest oczywiście związane ze zmniejszeniem tłumienia składowej zmiennej o częstotliwości drgań własnych tłumionych. Prezentowany filtr został zaimplementowany w module wagowym Siwax FTA

firmy Siemens, co umożliwiło przeprowadzenie pierwszych testów w warunkach przemysłowych.



Rys. 7. Odfiltrowany sygnał wagowy w etapie ważenia, uzyskany przy użyciu filtra parametrycznego, przy $\omega_k = 2\pi \cdot 2$ rad/s, $\omega_{max} = 2\pi \cdot 40$ rad/s i $\tau = 0,4$ s
Fig. 7. Filtered weighing signal obtained by parametric filter with $\omega_k = 2\pi \cdot 2$ rad/s, $\omega_{max} = 2\pi \cdot 40$ rad/s and $\tau = 0,4$ s

W tabeli 1 przedstawiono średnie czasy trwania etapu ważenia dla klasycznego filtra dolnoprzepustowego w zestawieniu z parametrycznym filtrem składowej stałej. Testy przeprowadzono na wadze porcjującej, gdzie wartość zadana wynosiła 50 kg, a wartości parametrów czasu uspokojenia i zakresu uspokojenia odpowiednio: $\Delta t = 400$ ms oraz $\Delta r = 0,04$ kg.

Stosując parametryczny filtr składowej stałej udało się skrócić czas trwania etapu ważenia o około 18 procent, co w odniesieniu do czasu trwania całego cyklu (8,11 s) daje 3 procentowy wzrost wydajności.

Tab. 1. Średnie czasy trwania etapów ważenia
Tab. 1. Average duration times of weighing stages

Opis	Średni czas trwania etapu ważenia
15 cykli, z zastosowaniem klasycznego filtra dolnoprzepustowego	1,42 s
22 cykle, z zastosowaniem parametrycznego filtra składowej stałej	1,17 s

6. Podsumowanie

Zastosowanie parametrycznego filtra składowej stałej do pomiaru masy umożliwia skrócenie czasu trwania pomiaru, przy zachowaniu tej samej dokładności. Obecnie trwają prace nad metodą optymalizacji parametrów ω_{max} , ω_0 i τ filtra, co sądząc po wstępnych wynikach umożliwi dalsze skrócenie czasu pomiaru o kolejne 20 procent. Wyniki badań sugerują również, iż kryteria uspokojenia a w szczególności czas uspokojenia Δt dla filtra o zmiennych parametrach może być wyraźnie krótszy w porównaniu z klasycznym układem filtrującym. Możliwość przyjmowania mniej restrykcyjnych wartości kryterium uspokojenia dla filtrów parametrycznych może skutkować dalszym zwiększeniem wydajności.

7. Literatura

- [1] International Recommendation OIML R 61-1. Automatic gravimetric filling instruments, Part 1: Metrological and technical requirements – Tests, Edition 2004.
- [2] Siwax FTA Device Manual. Siemens, 2005.
- [3] Roman Kaszyński. Filtry dolnoprzepustowe i składowej stałej o zmiennych parametrach. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001.
- [4] Przemysław Pietrzak: Skuteczna filtracja sygnałów w systemach ważenia. Praca magisterska, Szczecin 2006.

Artykuł recenzowany