Cezary SIWOŃ
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, SAMODZIELNY ZAKŁAD ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ I METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Zastosowanie operacji uśredniania do wyznaczania wartości ustalonej odpowiedzi skokowej przetwornika drugiego rzędu

Dr inż. Cezary SIWOŃ

Ukończył studia na wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w 1992r. Stopień doktora na tym samym wydziale uzyskał w 2004r. Pracuje jako adiunkt w Samodzielnym Zakładzie Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii Elektrycznej PŚk w Kielcach. Główne zainteresowania zawodowe dotyczą tworzenia oprogramowania dla systemów pomiarowych. Zajmuje się także zagadnieniami miernictwa dynamicznego.

e-mail: csiwon@tu.kielce.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania wartości ustalonej odpowiedzi skokowej przetwornika drugiego rzędu w sytuacji, gdy dostępny jest tylko początkowy, nieustalony przebieg tej odpowiedzi. W przedstawionym rozwiązaniu wykorzystano operację uśredniania. Wartości średnie z rejestrowanej odpowiedzi tworzą nowy sygnał, który dla przetworników o małym tłumieniu szybciej osiąga wartość ustaloną od odpowiedzi skokowej. Zaprezentowano również metodę aproksymacji uzyskanego sygnału funkcją opisująca uśrednioną odpowiedź przetwornika drugiego rzędu. Działanie metody zaprezentowano na przykładzie ważenia modelu pojazdu w ruchu.

Abstract

This paper presents a method of final value estimating of the second order sensor step response. The approach considered here is based on averaging operation. Average values of measured signal create a new signal. This signal reaches a final value in shorter time than step response of the under damped sensors. There was presented a non-linear regression of averaging signal by obtained function, which describes a dynamics of averaging out waveform of second order sensor. Presented method was applied in weighing in motion experiment.

1. Wstęp

W wielu systemach pomiarowych występują przetworniki drugiego rzędu pobudzane wymuszeniem skokowym. Przykładem takiego systemu jest układ pomiarowy do ważenia obiektów w ruchu z czujnikiem siły. Ze względów konstrukcyjnych czujniki te mają małe tłumienie, o wartości poniżej 0,1. Pobudzenie wagi przejeżdzającym przez jej platformę obiektem powoduje wygenerowanie na wyjściu przebiegu oscylacyjnego, słabo tłumionego. W stosowanych układach ważenia w ruchu stosuje się krótkie platformy. Czas trwania sygnału na wyjściu pobudzonego czujnika jest zbyt krótki, aby odpowiedź osiągnęła stan ustalony. Czynnikami wpływającymi na ten fakt są: prędkość przejazdu obiektu po platformie, długość platformy, tłumienie czujników obciążonych platformą i masą ważoną.

Proponowane są różne metody estymacji wartości ustalonej na podstawie początkowej nieustalonej części odpowiedzi, w tym m.in.: algorytmy identyfikacyjne, aproksymację nieliniową, sztuczne sieci neuronowe. Na jakość estymacji wpływ mają również zakłócenia obecne w trakcie procesu dynamicznego. W przypadku ważenia w ruchu przyczyną powstawania zakłóceń jest przemieszczanie się obiektu w trakcie pomiaru i nierównomierność nacisku. W większości przypadków zakłócenia można zamodelować funkcją okresową o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości drgań tłumionych odpowiedzi czujnika.

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania wartości ustalonej na podstawie odpowiedzi skokowej zawierającej zakłócenie o charakterze funkcji okresowej. Aby zminimalizować wpływ zakłócenia na wyznaczanie tej wartości zastosowano metodę tłumienia takiego zakłócenia polegającą na uśrednianiu odpowiedzi.

2. Model odpowiedzi skokowej przetwornika

Równanie odpowiedzi przetwornika drugiego rzędu ma postać:

$$y(t) = a_1 + a_2 e^{-a_3 t} \sin(a_4 t + a_5) \tag{1}$$

gdzie dla zerowych warunków początkowych:

$$\begin{aligned} a_1 &= y_u \\ a_2 &= -\frac{a_1}{\sqrt{1-\xi^2}} \\ a_3 &= \omega_0 \xi \\ a_4 &= \omega_0 \sqrt{1-\xi^2} \\ a_5 &= arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \end{aligned}$$

Poszukiwaną wartością jest wartość ustalona y_u równa parametrowi a_1. Dla odpowiedzi o bardzo małym tłumieniu najprostszą metodą estymacji y_u jest wyznaczenie wartości średniej y_s w przedziale t_s równym czasowi rejestracji t_r:

$$y_S(t_s) = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} y(t) dt \tag{2}$$

Dla sygnału dyskretnego wartość średnią oblicza się z poniższej zależności:

$$y_S = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} y[n] \tag{3}$$

W celu oceny estymaty wartości ustalonej w postaci wartości średniej można wyznaczyć funkcję zmienności średniej w zależności od czasu uśredniania. Na podstawie wzorów (1) i (2) otrzymuje się:

$$y_s(t_r) = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} (a_1 + a_2 e^{-a_3 t} \sin(a_4 t + a_5)) dt \tag{4}$$

Po wyznaczeniu całki, podstawieniu granic całkowania i przekształceniach otrzymujemy zależność na funkcję zmian średniej od czasu uśredniania:

$$\begin{aligned} y_s(t_r) = a_1 &+ \frac{a_2}{t_r\left(a_3^2 + a_4^2\right)} e^{-a_3 t} A \sin(a_4 t_r + \varphi) \\ &+ \frac{a_2}{t_r} \frac{a_3 \sin a_5 + a_4 \cos a_5}{a_3^2 + a_4^2} \end{aligned} \tag{5}$$

gdzie:

$$A = \sqrt{\left(a_4 \sin a_5 - a_3 \cos a_5\right)^2 + \left(-a_3 \sin a_5 - a_4 \cos a_5\right)^2}$$

$$\varphi = arctg \frac{-a_3 \sin a_5 - a_4 \cos a_5}{a_4 \sin a_5 - a_3 \cos a_5}$$

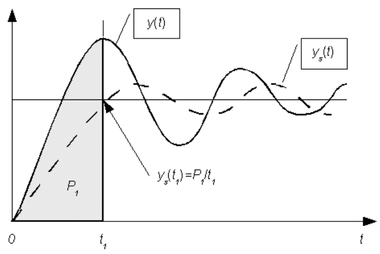
Przyjmując nastepujące parametry zastępcze:

$$b_1 = a_1$$
$$b_2 = A$$
$$b_3 = a_3$$
$$b_4 = a_4$$
$$b_5 = \varphi$$
$$b_6 = a_2 \frac{a_4 \cos a_5 + a_3 \sin a_5}{a_3^2 + a_4^2}$$

funkcja zmienności wartości średniej od czasu uśredniania przyjmuje postać:

$$y_s(t) = b_1 + \frac{b_2}{t} e^{-b_3 t} \sin(b_4 t + b_5) + \frac{b_6}{t} \tag{6}$$

Na rysunku 1 przedstawiono wykres ilustrujący zależność pomiędzy funkcją odpowiedzi skokowej przetwornika drugiego rzędu a wyznaczoną na jej podstawie funkcją zmian średniej. Wartość funkcji $y_s(t)$ w chwili t_1 jest równa średniej odpowiedzi przetwornika $y(t)$ liczonej w przedziale od 0 do t_1.



Rys. 1. Zależność pomiędzy odpowiedzią $y(t)$ a wyznaczoną funkcją $y_s(t)$

Z wykresu wynika, że wyznaczona funkcja zmian średniej oscyluje wokół wartości ustalonej odpowiedzi. Oscylacje te są znacznie silniej tłumione niż te występujące w odpowiedzi skokowej. Funkcja $y_s(t)$ osiąga wartość ustaloną równą wartości ustalonej odpowiedzi skokowej przetwornika gdyż:

$$\lim_{t\to\infty} y_s(t) = \lim_{t\to\infty}\left(b_1 + \frac{b_2}{t} e^{-b_3 t} \sin(b_4 t + b_5) + \frac{b_6}{t} \right) = b_1 \tag{7}$$

a parametr b_1 jest równy a_1 .

Z przedstawionego wykresu można zatem wywnioskować, że funkcja średniej $y_s(t)$ osiąga wartość ustaloną znacznie szybciej od odpowiedzi skokowej, gdyż posiada silniej tłumione oscylacje.

W celu oceny zastosowania wartości średniej z nieustalonej części odpowiedzi skokowej przetwornika jako estymaty wartości końcowej należy porównać czasy odpowiedzi t_u. Czas odpowiedzi wyznacza się dla ustalonej wartości błędu ε, definiowanego jako błąd względny wynikający z różnicy wartości chwilowej odpowiedzi $y(t_u)$ od wartości ustalonej y_u:

$$\varepsilon = \frac{y(t_u) - y_u}{y_u} \tag{8}$$

Zależność czasu t_u dla sygnału $y(t)$ od tłumienia ξ i pulsacji drgań swobodnych ω_0 jest następująca:

$$t_u = -\frac{\ln\left(\varepsilon\sqrt{1-\xi^2}\right)}{\xi\omega_0} \tag{9}$$

Dla sygnału $y_s(t)$ można zapisać równanie, z którego metodami numerycznymi można wyznaczyć wartość czasu t_u:

$$\varepsilon = \frac{\frac{b_2}{t_u} e^{-t_u b_3} + \frac{b_6}{t_u}}{b_1} \tag{10}$$

Powyższe zależności wyznaczono na podstawie obwiedni drgań tłumionych funkcji $y(t)$ i $y_s(t)$. Rzeczywiste wartości czasu t_u mogą być równe lub mniejsze od wartości obliczonych. Zatem wyznaczony czas t_u można traktować jako graniczny.

Dla kilku wartości tłumienia ξ wyznaczono czasy odpowiedzi dla dwóch wartości błędu. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Czasy odpowiedzi $y(t)$ i $y_s(t)$

Czas odpowiedzi t_u		Tłumienie			
		ξ = 0,01	ξ = 0,05	ξ = 0,1	ξ = 0,3
$y(t)$	t_u przy ε = 1%	460,5	59,9	30,0	10,0
	t_u przy ε = 5%	299,6	92,1	46,0	15,5
$y_s(t)$	t_u przy ε = 1%	58,5	31,1	26,8	60,2
	t_u przy ε = 5%	17,3	12,7	10,8	12,5

Z zestawienia wynika, że sygnał $y_s(t)$, wyznaczony na podstawie odpowiedzi skokowej przetwornika o tłumieniu równym 0,1 lub mniejszym, osiąga szybciej wartość ustaloną z określonym błędem ε aniżeli odpowiedź $y(t)$. Można zatem stwierdzić, że wartość średnia sygnału wyznaczona w czasie od t = 0 do $t_r = t_u$ jest estymatą wartości ustalonej wyznaczoną z błędem ε.

Przetworniki charakteryzujące się tłumieniem powyżej 0,1 generują odpowiedź, która po uśrednianiu nie prowadzi do szybszego uzyskania wartości ustalonej. Odpowiedź $y(t)$ takiego przetwornika osiąga tę wartość w znacznie krótszym czasie niż odpowiedź uśredniona.

Wyznaczanie wartości średniej z odpowiedzi skokowej przetwornika drugiego rzędu o tłumieniu poniżej 0,1 daje możliwość prostej w realizacji metody wyznaczania wartości ustalonej. Czas rejestracji odpowiedzi musi być co najmniej równy czasowi t_u, który wyznaczono dla danego błędu ε. W sytuacji, gdy czas t_r odpowiedzi $y(t)$ jest zbyt krótki należy sięgnąć do innych rozwiązań, aby estymata wartości ustalonej mogła być wyznaczona dokładniej.

3. Aproksymacja odpowiedzi uśrednionej

Rejestrując sygnał dyskretny $\{y[n]\}$ odpowiedzi skokowej przetwornika można na bieżąco wyznaczać średnią dla każdej próbki n wg poniższego wzoru:

$$y_s[n] = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} y[k] \tag{11}$$

Wyznaczone wartości średnie składać się będą na wartości próbek nowego sygnału $\{y_s[n]\}$. Otrzymany sygnał $\{y_s[n]\}$ jest dyskretną postacią sygnału ciągłego $y_s(t_r)$ opisanego funkcją (6), zatem dla pewnego wektora $\boldsymbol{b}$ i dla każdej dowolnej próbki winna spełniona być równość:

$$y_s[n] = y_s(Tn) \tag{12}$$

gdzie T jest okresem próbkowania sygnału $y[n]$.

Rozwiązanie problemu wyznaczenia wartości ustalonej polegać będzie na znalezieniu takich wartości wektora parametrów $\boldsymbol{b}$ funkcji $y_s(t)$, które w najlepszy sposób pozwolą na opisanie tą funkcją sygnału $\{y_s[n]\}$. Do tego celu została wykorzystana nieliniowa regresja, której zadaniem jest znalezienie wartości wektora $\boldsymbol{b}$ spełniających kryterium minimum w sensie średniokwadratowym. Estymatą wartości ustalonej jest wartość parametru b_1.

Aproksymację sygnału $\{y_s[n]\}$ zdecydowano się wykonać algorytmem Levenberg-Marquardt'a, który jest szybki oraz niezawodny w poszukiwaniu minimum położonego daleko od punktu startowego (pierwszego przybliżenia wektora $\boldsymbol{b}$).

4. Wyniki aproksymacji dla symulowanego sygnału $y_s(t)$

Korzystając z zależności (1) zasymulowano odpowiedź wagi, którą ważono obiekt o masie 100 kg. Wartości tłumienia i pulsacji drgań swobodnych dla czujnika obciążonego platformą i masą ważoną wynosiły:

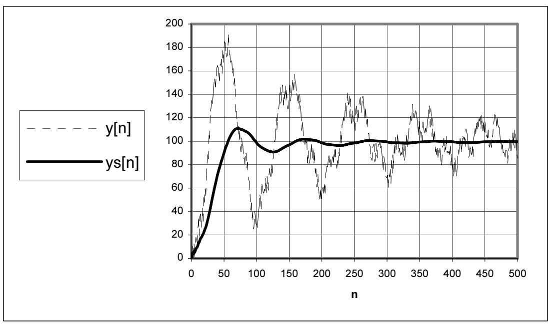
$$\xi = 0{,}08$$

$$\omega_0 = 3{,}16$$

Sygnał $y[n]$ uzyskano wyznaczając wartości funkcji $y(t)$ w dyskretnych chwilach czasowych nT, przyjmując T = 0,01s i liczbę próbek sygnału N = 500.

Do odpowiedzi dodano zakłócenie w postaci sygnału okresowego o częstotliwości pięciokrotnie większej od częstotliwości drgań tłumionych oraz szum biały. Amplituda zakłóceń okresowych wynosiła 10 % wartości ustalonej.

Z zasymulowanej odpowiedzi skokowej $y[n]$ wyznaczono sygnał $y_s[n]$. Odpowiedź $\{y[n]\}$ i uzyskany sygnał $\{y_s[n]\}$ przedstawiono na rysunku 2.

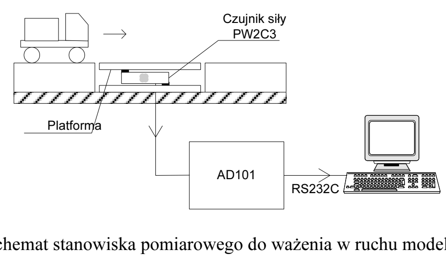


Rys. 2. Symulowana odpowiedź skokowa $y[n]$ i utworzony sygnał $y_s[n]$

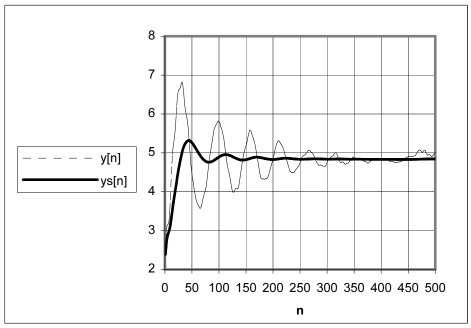
Metodą aproksymacji nieliniowej całego sygnału $\{y_s[n]\}$ wyznaczono wartości składowych wektora parametrów $\boldsymbol{b}$ funkcji $y_s(t)$. Wartość składowej ustalonej wyniosła 100,05 kg, czyli wyznaczona została z błędem δ = 0,05%. Gdyby przyjąć za wartość ustaloną ostatnią próbkę sygnału $\{y_s[n]\}$, czyli średnią wszystkich zarejestrowanych próbek $\{y[n]\}$, to otrzymalibyśmy wynik 99,69 kg obarczony błędem o wartości δ = 0,31%.

5. Wyniki aproksymacji sygnału otrzymanego z pomiaru

Na stanowisku pomiarowym do ważenia w ruchu, przedstawionym na rysunku 3, zarejestrowano odpowiedź $y[n]$ wywołaną przejazdem modelu pojazdu o masie 4,827 kg. Sygnał został zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 600 Hz a prędkość przejazdu wynosiła około 0,2 m/s. Zarejestrowaną odpowiedź $\{y[n]\}$ i utworzony sygnał $\{y_s[n]\}$ przedstawiono na rysunku 4.



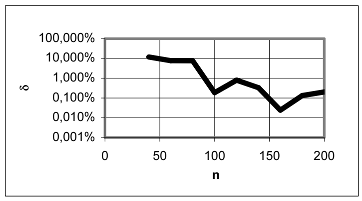
Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do ważenia w ruchu modelu pojazdu



Rys. 4. Zarejestrowana odpowiedź $y[n]$ wywołana ważeniem w ruchu masy 4,827 kg i utworzony sygnał $y_s[n]$

W wyniku aproksymacji sygnału $\{y_s[n]\}$ uzyskano wartość ustaloną równą 4,826 kg. Błąd względny o wartości δ = 0,1% wyznaczono przyjmując za wartość poprawną masę 4,827 kg, którą uzyskano w trakcie ważenia z niepewnością pomiarową ±0,07% nieruchomego pojazdu. Mała wartość błędu w prezentowanym przypadku oznacza, że metoda umożliwia pomiar wartości ustalonej z dokładnością porównywalną z pomiarem wartości chwilowej po zaniknięciu oscylacji w odpowiedzi.

Przeprowadzono również szereg aproksymacji w zależności od długości sygnału $\{y_s[n]\}$, aby wyznaczyć, dla jakiej minimalnej długości sygnału można otrzymać wartość ustaloną z błędem nie większym niż 1%. Wyniki w postaci wykresu błędu estymacji wartości ustalonej w funkcji liczby próbek sygnału $\{y_s[n]\}$ przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres błędu estymacji wartości ustalonej w zależności od długości sygnału $\{y_s[n]\}$

Z wykresu wynika, że minimalna dla tego przypadku długość sygnału $\{y_s[n]\}$, potrzebna aby wyznaczyć wartość ustaloną z błędem δ = 1% metodą aproksymacji, wynosi 100 próbek. Odpowiada to czasowi rejestracji równemu 1,5 okresu drgań swobodnych. Gdyby wyznaczać estymatę tylko na podstawie sygnału $\{y[n]\}$, należałoby rejestrować sygnał o długości około 180 próbek, czyli o czasie równym 2,7 okresu drgań swobodnych.

6. Wybór punktów pomiarowych do aproksymacji

Przedstawione w poprzednim punkcie wyniki aproksymacji sygnałów symulowanych i zmierzonych wskazują na stosowanie coraz większej liczby punktów pomiarowych w procesie aproksymacji. Znacząco wydłuża to czas obliczeń i prowadzi niekiedy do błędnych rozwiązań.

Właściwość dobrego dopasowania sygnału $\{y_s[n]\}$ do funkcji $y_s(t)$ skłania do zredukowania liczby potrzebnych próbek tego sygnału do obliczeń, gdyż każda próbka $\{y_s[n]\}$ zawiera w sobie pewną informację o wszystkich poprzednich próbkach zarejestrowanej odpowiedzi.

Przeprowadzając aproksymację danych pomiarowych, należy dysponować minimalną ich liczbą, która nie może być mniejsza od liczby wyznaczanych parametrów przyjętej funkcji regresji. Dla funkcji opisującej odpowiedź przetwornika drugiego rzędu jak również dla funkcji opisującej utworzony na jej podstawie sygnał $\{y_s[n]\}$ (gdy szukanym wektorem parametrów funkcji $y_s(t)$ w postaci wzoru 5 będzie wektor $\boldsymbol{a}$) liczba parametrów szukanych wynosi 5. Zatem minimalna liczba potrzebnych próbek jest taka sama. W celu sprawdzenia, czy taka liczba próbek jest wystarczająca i na ile można zredukować liczbę próbek sygnału $\{y_s[n]\}$aby nie przekroczyć założonego błędu 1%, przeprowadzono odpowiednie badania.

Przeprowadzono eksperyment polegający na aproksymacji szeregu sygnałów $\{y^i_s[n]\}$ utworzonych na podstawie jednego $\{y_s[n]\}$. Kolejne $\{y^i_s[n]\}$ uzyskiwano poprzez próbkowanie oryginalnego $\{y_s[n]\}$ częstotliwością i razy mniejszą od częstotliwości próbkowania f_p sygnał $\{y[n]\}$. W praktyce realizowano to poprzez wybieranie co i–tej próbki z sygnału macierzystego $\{y_s[n]\}$.

W ten sposób długość uzyskiwanego sygnału określona była zależnością

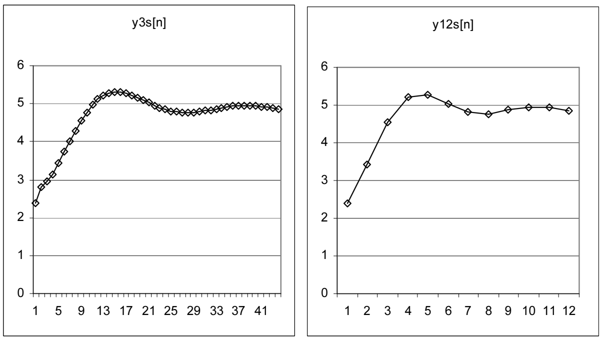
$$n^i = 1 + n / i \tag{13}$$

gdzie symbol / jest operatorem dzielenia całkowitego. Częstotliwość próbkowania sygnałów wyraża zależność:

$$f^i{}_p = \frac{f_p}{i} \tag{14}$$

dla i = 2, 3, 4 ... m. Wartość m jest uzależniona od długości sygnału i minimalnej liczby szukanych parametrów w trakcie aproksymacji. Jak podano wcześniej dla przyjętej funkcji $y_s(t)$ liczba tych parametrów wynosi 5, więc i minimalna liczba punktów pomiarowych nie może być mniejsza od tej wartości.

Jako sygnał bazowy wykorzystano jeden z sygnałów uzyskanych w wyniku pomiarów masy o wartości 4,827 kg. Dwa przebiegi utworzone na podstawie sygnału bazowego przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Dwa utworzone przebiegi o zmniejszonej liczbie punktów pomiarowych

Wyniki przeprowadzonych aproksymacji zawiera tabela 2.

Tab. 2. Estymaty wartości masy 4,827 kg wyznaczone na podstawie sygnału $\{y_s[n]\}$ w zależności od liczby próbek

Sygnał	Liczba próbek n	M [kg]	$\lvert\delta\rvert$ [%]
y1	140	4,846	0,38%
y2	71	4,844	0,36%
y3	48	4,843	0,34%
y4	36	4,843	0,32%
y5	29	4,842	0,31%
y6	25	4,841	0,29%
y7	21	4,843	0,32%
y8	19	4,843	0,33%
y9	17	4,846	0,40%
y10	15	4,847	0,41%
y11	14	4,844	0,34%
y12	13	4,842	0,30%
y13	12	4,839	0,24%
y46	5	4,867	0,83%

Przeprowadzone pomiary potwierdzają, że zredukowanie liczby próbek sygnału $\{y_s[n]\}$ nie wpłynęło istotnie na wynik końcowy. Zmniejszenie liczby próbek ze 140 do 12 nie spowodowało wzrostu błędu pomiaru powyżej 0,41% i błąd praktycznie utrzymywał się na stałym poziomie. Dla minimalnej liczby próbek błąd pomiaru wzrósł ponad dwukrotnie, ale nie przekroczył 1%. Zakładając, że błąd 1% jest dla pomiaru akceptowalny, wystarczające jest uwzględnienie minimalnej liczby próbek potrzebnych dla wykonania aproksymacji.

Dla porównania wykonano aproksymację oryginalnego sygnału $\{y[n]\}$ o zredukowanej ze 140 do 5 próbek długości taką samą metodą jak sygnały $y^i_s[n]$. Uzyskano wynik 4,896 kg, dla którego błąd wyniósł 1,42%. Jak widać zmniejszenie do minimum danych pomiarowych dla sygnału odpowiedzi spowodowało prawie dwukrotny wzrost błędu pomiaru w stosunku do aproksymacji odpowiedzi poddanej uśrednianiu.

W sytuacji, gdy błąd pomiarowy należy utrzymać na najniższym poziomie, redukcja liczby pomiarów w sygnale $\{y_s[n]\}$ nie powinna być tak radykalna. Z wyników przedstawionych w tabeli wywnioskować można, że zmniejszenie do 12 próbek nie pogarsza wyników estymacji.

7. Wnioski

Z przedstawionych wyników symulacji i eksperymentu wynika, że wyznaczanie wartości średniej z odpowiedzi skokowej przetworników drugiego rzędu o małym tłumieniu jest prostą metodą wyznaczania wartości ustalonej na podstawie początkowego jej przebiegu. Warunkiem jest, aby czas rejestracji sygnału czujnika był równy czasowi odpowiedzi t_u o zadanym błędzie ε. Rozwiązanie to jest poprawne dla czujników o tłumieniu mniejszym niż 0,1.

W celu skrócenia czasu rejestracji lub wyznaczenia wartości ustalonej z mniejszym błędem, można aproksymować przebieg uzyskanego sygnału $\{y_s[n]\}$ funkcją $y_s(t)$ opisującą ten sygnał. Wynikiem aproksymacji nieliniowej jest wektor parametrów funkcji aproksymującej, którego jedna ze składowych jest wartością ustaloną.

Aproksymacja uśrednionej odpowiedzi wyznaczoną funkcją $y_s(t)$ daje możliwość radykalnego zmniejszenia liczby punktów pomiarowych. Powoduje to znaczne zmniejszenie czasu obliczeń i zmiejsza liczbę błędnych wyników aproksymacji.

Przedstawione wyniki symulacji i pomiaru rzeczywistego dowodzą poprawnego działania przedstawionej metody aproksymacji.

8. Literatura

[1] C. Ferguson: Weighing vehicles in motion, Measurement and Control, Vol 2, December, 1969.

[2] Z. Kaczmarek, C. Siwoń: Zastosowanie sieci neuronowej w procesie ważenia dynamicznego, Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 4/1999, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.

[3] Z. Kaczmarek, C. Siwoń: Wyznaczanie wartości ustalonej odpowiedzi skokowej przetwornika drugiego rzędu z początkowej części jej przebiegu, Kongres Metrologii, Wrocław 2004.

[4] M. Niedźwiecki, A. Wasilewski: Application of adaptive filtering to dynamic weighing of vehicles. Control Eng. Practice, Vel 4, No 5, pp 635-644, 1996.

Title: The application of an averaging operation to the prediction of final value of the second order sensor's step response

Artykuł recenzowany