

Estymacja okresu sygnału enkodera w warunkach zakłóceń elektromagnetycznych

Streszczenie. W artykule opisano nowy algorytm cyfrowego przetwarzania sygnału pochodzącego z enkodera pracującego w warunkach zakłóceń elektromagnetycznych. Zadaniem proponowanego algorytmu jest wykrycie pomiarów anomalnych i niwelacja ich wpływu na układ kontroli prędkości wózka spawalniczego. Proponowana metoda opiera się na modelowaniu zakłóceń w formie zmian wariancji szumu pomiarowego i wykorzystaniu podejścia wielohipotezowego oraz filtracji nieliniowej z licznym na bieżąco prawdopodobieństwem stanu kanału pomiarowego. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły poprawność pracy proponowanego algorytmu w warunkach zakłóceń.

Abstract. The paper describes new digital signal processing algorithm for velocity control system which uses position encoder. The algorithm ensures immunity to outlier measurements caused by electromagnetic disturbances. The proposed method is based on nonlinear multihypotheses estimation with use of probabilities of the measurement channels state. The performance of the proposed method is verified by laboratory tests of encoder working in a welding carriage in presence of disturbances coming from a HF arc ignition process and by series of simulations. Obtained results revealed good performance of the proposed method and shows that it can preserve the normal operation of the welding carriage velocity controller in presence of electromagnetic disturbances. **Estimation of encoder signal period in presence of electromagnetic disturbances**

Słowa kluczowe: przetwarzanie sygnałów, zakłócenia elektromagnetyczne, sygnał enkodera, sterowanie wózkiem spawalniczym.

Keywords: signal processing, electromagnetic disturbances, encoder signal, control of welding carriage.

Wstęp

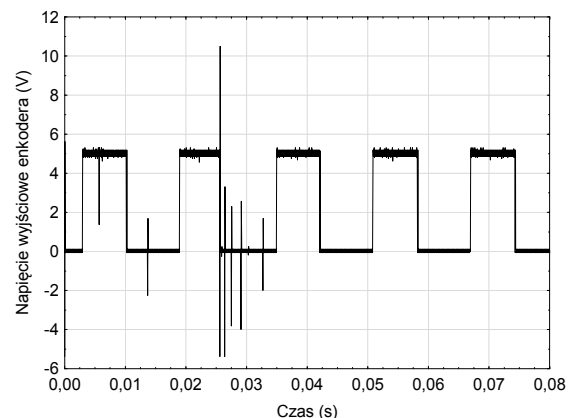
Wrażliwość na zakłócenia staje się coraz poważniejszym problemem w elektronice przemysłowej ze względu na nieprzyjazne środowisko w sensie kompatybilności elektromagnetycznej. Jest to szczególnie wyraźne w przypadku urządzeń i systemów wymagających przepływu prądów o dużym natężeniu, jak na przykład ma to miejsce w technologiach spawalniczych. Skutkuje to powstawaniem pola elektromagnetycznego o szerokim spektrum [1]. Dodatkowo w technologii TIG stosuje się systemy bezdotykowego zajarzania łuku (HF). Ich działanie polega na generowaniu wysokiego napięcia w celu spowodowania wyładowania iskrowego pomiędzy elektrodą wolframową, a podłożem. Wyładowanie to indukuje kanał plazmowy. Problem pojawia się w momencie, gdy spawany materiał jest zanieczyszczony, a powstałe wyładowanie powoduje przepływ prądu przez elementy sąsiadujące z palnikiem. W takim przypadku powstają zakłócenia na tyle istotne, iż wpływają na pracę podzespołów elektronicznych, w tym enkoderów powodując pojawienie się dodatkowych impulsów [2, 3, 4, 5], a co za tym idzie błędnym odczytem prędkości. Natomiast niemalże każdy proces spawalniczy, zwłaszcza MIG/MAG, SAW, a także proces cięcia plazmą wymaga stałej i precyzyjnej prędkości prowadzenia palnika [6]. Zadowalającą dokładność pomiaru prędkości można uzyskać za pomocą enkoderów obrotowych o wysokiej rozdzielczości [7]. Najczęściej stosowanymi są enkodery inkrementalne (nieposiadające informacji o pozycji bezwzględnej) opierające swą zasadę działania na czujniku Hall'a lub transporcie szczelinowym. Sygnał wyjściowy czujnika ma zazwyczaj kształt prostokątny lub składa się z serii impulsów. Częstotliwość takiego przebiegu jest proporcjonalna do prędkości obrotowej [7]. System sterujący napędem wymaga wiarygodnego sygnału sprzężenia zwrotnego. Jednakże w przypadku wielu aplikacji przemysłowych, kanał pomiarowy może zostać zakłócony przez sygnał o charakterze impulsowym, co może skutkować nieprawidłową prędkością jazdy podczas pracy z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. W przypadku standardowego regulatora prędkości spowoduje to obniżenie prędkości wózka.

Niniejszy artykuł porusza zagadnienie przetwarzania sygnałów enkodera w warunkach zakłóceń. Skupia się on na problemie wyznaczenia okresu sygnału enkodera będącego elementem układu sterowania prędkością jazdy

wózka spawalniczego. Powszechnie stosowana metoda pomiaru okresu sygnału enkodera polega na zliczaniu jego zboczy w jednostce czasu. Niestety nie sprawdza się ona w przypadku pojawiających się zakłóceń impulsowych. W artykule zostanie zaproponowany algorytm wykorzystujący estymację nieliniową, którego celem jest poprawa jakości estymacji okresu sygnału enkodera w powyższych warunkach. Badania testowe przeprowadzono na wózku spawalniczym SWC-14 „Lizard” firmy PROMOTECH. Na ich podstawie sformułowano modele matematyczne sygnału i zakłóceń oraz zaproponowano algorytm estymacji. Następnie przeprowadzono szereg symulacji mających na celu oszacowanie błędów estymacji i porównanie ze stosowaną w urządzeniu metodą polegającą na zliczaniu zboczy.

Testy laboratoryjne

Podczas eksperymentu bezdotykowe zajarzanie łuku (HF) było symulowane za pomocą generatora ESD typu SESD216 firmy Schlöder. Jako napięcie wyjściowe przyjęto -10 kV, przy założeniu wyładowania przewodzonego. Wózek był umieszczony na stalowym podłożu i ustawiony w trybie spawania ciągłego. Sygnał wyjściowy z enkodera był doprowadzony do oscyloskopu Agilent 54622D za pośrednictwem kabla ekranowanego. Podczas normalnej jazdy wózka dokonywano serii wyładowań o częstotliwości repetycji wynoszącej 10 Hz. Przykładowy przebieg czasowy sygnału pochodzącego z enkodera przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Przykład zarejestrowanych zakłóceń sygnału enkodera

Z danych przedstawionych na rysunku 1 wynika, że wyładowanie ESD wywołało pojawienie się szeregu pojedynczych i wielokrotnych impulsów w mierzonym sygnale pochodzącym z enkodera.

Model matematyczny sygnału enkodera i kanału pomiarowego

Matematyczny model sygnału enkodera można sformułować w następującej postaci:

$$(1) \quad x(k+1) = x(k) + \Delta m \delta((kT_s \bmod T_o) + T_L) - \Delta m \delta(kT_s \bmod T_o)$$

gdzie $x(k)$ jest niezakłóconym sygnałem enkodera, ze stanem początkowym równym niskiemu poziomowi sygnału: $x(0)=m_1$, Δm jest różnicą między niskim i wysokim poziomem sygnału enkodera, $\delta(k)$ delta Kroneckera równa $\delta(0)=1$ oraz $\delta(k)=0$ dla $k \neq 0$, T_s jest okresem próbkowania, T_o to okres sygnału enkodera, mod oznacza operację modulo (reszta z dzielenia), T_L to czas trwania niskiego poziomu sygnału.

Zakłócenia pomiaru $y(k)$ mogą być modelowane jako zmiany wariancji szumu pomiarowego [2, 5, 8, 9] w równaniu obserwacji w następujący sposób:

$$(2) \quad y(k) = x(k) + \gamma(k)v(k)$$

gdzie $y(k)$ to wartość mierzona, $v(k)$ jest gaussowskim szumem pomiarowym o zerowej wartości oczekiwanej i wariancji $R(k)=\sigma^2(k)$, $\gamma(k)$ jest mnożnikiem modelującym zakłócenia, który przyjmuje wartość $\gamma(k)=1$ w normalnych warunkach pomiarowych oraz wartość $\gamma(k)=\gamma_0 >> 1$ w przypadku dodatkowych zakłóceń oddziałujących na kanał pomiarowy powodujących pomiary anomalne [5, 9].

W przypadku zakłóceń nieskorelowanych w czasie ciąg $\gamma(k)$ może być opisany jako sekwencja nieskorelowana z prawdopodobieństwem P^{γ_0} występowania wysokich wartości $\gamma(k)$ (tj. $\gamma(k)=\gamma_0$).

Estymacja sygnału w obecności pomiarów anomalnych

Detekcję pomiarów anomalnych można przeprowadzić na podstawie testowania następujących czterech hipotez [10] opisujących mierzony sygnał enkodera:

$$(3) \quad \begin{aligned} H_1: & y(k) \in N[m_1, \sigma] \\ H_2: & y(k) \in N[m_2, \sigma] \\ H_3: & y(k) \in N[m_1, \gamma_0 \sigma] \& y(k) \notin \{N[m_1, \sigma], N[m_2, \sigma]\} \\ H_4: & y(k) \in N[m_2, \gamma_0 \sigma] \& y(k) \notin \{N[m_1, \sigma], N[m_2, \sigma]\} \end{aligned}$$

gdzie H_1, H_2 to hipotezy odnoszące się do stanu niskiego i wysokiego sygnału enkodera w przypadku braku dodatkowych zakłóceń, natomiast H_3, H_4 odnoszą się do sytuacji pojawiających się pomiarów anomalnych, N oznacza rozkład normalny, m_1, m_2 to niski i wysoki poziom sygnału enkodera, σ to odchylenie standardowe szumu pomiarowego, γ_0 to mnożnik opisujący anomalie.

Po uzyskaniu kolejnego pomiaru, prawdopodobieństwa przypisane każdej z hipotez H_i ($i=1, \dots, 4$) można wyznaczyć w następujący sposób:

$$(4) \quad p_i(k) = \frac{f_i(y(k)/H_i)}{\sum_{n=1}^4 f_n(y(k)/H_n)} \quad i=1, \dots, 4$$

gdzie f_i jest wartością funkcji gęstości prawdopodobieństwa przypisaną do i -tej hipotezy (3), na przykład:

$$(5) \quad f_1(y(k)/H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y(k)-m_1)^2}{2\sigma^2}\right)$$

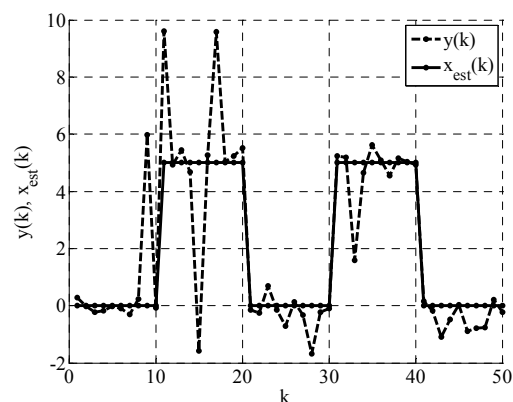
Estymacja prędkości wózka spawalniczego

Celem prezentowanego algorytmu jest estymacja prędkości wózka spawalniczego, która byłaby odporna na zakłócenia. W praktyce pomiar prędkości można sprowadzić do wyznaczenia okresu T_o sygnału enkodera. Analizując dynamikę wózka oraz właściwości systemu regulacji prędkości można przyjąć, że okres T_o sygnału enkodera zmienia się nie więcej niż 10% od okresu do okresu. Wyznaczanie estymat okresu $\hat{T}_o(k)$ można dokonać na podstawie funkcji gęstości warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa: $f(y(k)/\hat{T}_o(k-1), H_i)$. W tym przypadku, po inicjalizacji odbywającej się przed rozpoczęciem spawania, wykrycie momentu zmiany poziomu sygnału prowadzone jest w sąsiedztwie poprzedniej estymaty $\hat{T}_o(k-1)$ przy użyciu procedury detekcji anomalii i estymacji wartości sygnału (3) - (5).

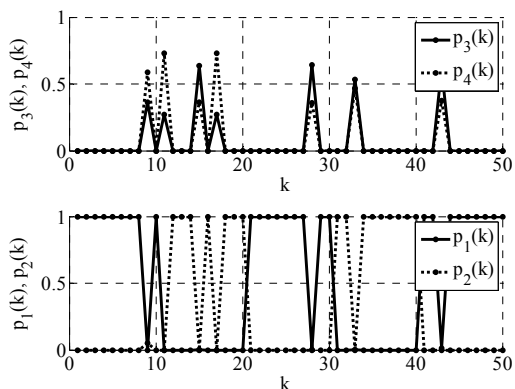
Badania symulacyjne

Właściwości proponowanej metody były testowane symulacyjnie metodą Monte Carlo (liczba symulacji $N=100$). W ramach testów laboratoryjnych (opisanych w rozdziale "Testy laboratoryjne") zmierzono poziomy napięcie, wyznaczono parametry szumu i zakłóceń oraz parametry czasowe sygnału. Na tej podstawie przyjęto następujące parametry modelu (1) - (3): poziomy napięcie: $m_1=0V$, $m_2=5V$, $\sigma=0,3V$, mnożnik $\gamma_0=20$, parametry czasowe: $T_o=5ms$, $T_L=2,5ms$, częstotliwość próbkowania $f_s=4kHz$. Typowa procedura zapłonu łuku trwa do $T_{ai}=5s$, w związku z czym przyjęto czas symulacji równy $T_{sym}=5s$. W programie badań uwzględniono zakłócenia nieskorelowane o szerokim zakresie P^{γ_0} i γ_0 .

Na rysunku 2 został przedstawiony pochodzący z symulacji przykład wpływu nieskorelowanych zakłóceń ($P^{\gamma_0}=0,1$) na pomiary sygnału enkodera ($y(k)$) oraz estymowany z użyciem proponowanej metody sygnał enkodera ($x_{est}(k)$). Na rysunku 3 zamieszczono prawdopodobieństwa wykrycia anomalii (p_3 i p_4) oraz prawdopodobieństwa niskiego i wysokiego poziomu sygnału (p_1 i p_2) wyznaczone proponowaną metodą dla przebiegu $y(k)$ z rysunku 2.

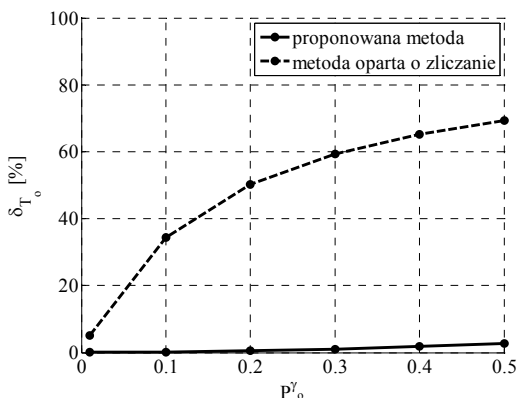


Rys.2. Przykładowy przebieg pomiarów w obecności nieskorelowanych zakłóceń oraz estymowany sygnał enkodera

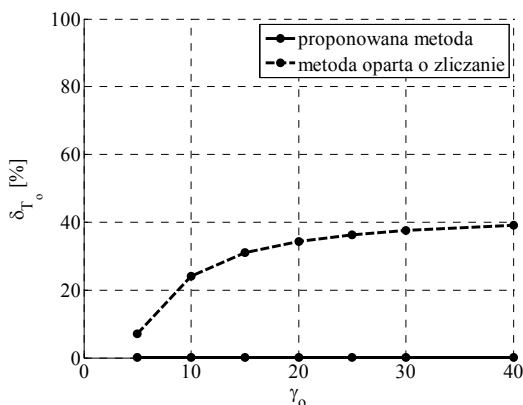


Rys.3. Prawdopodobieństwa wykrycia anomalii (p_3 i p_4) oraz prawdopodobieństwa niskiego i wysokiego poziomu sygnału (p_1 i p_2) dla sygnału $y(k)$ z rysunku 2

Właściwości proponowanej metody zostały zbadane poprzez porównanie dokładności wyznaczania okresu T_o z jej użyciem oraz powszechnie stosowanej metody polegającej na zliczaniu narastających i opadających zboczy sygnału enkodera w jednostce czasu. Na rysunku 4 przedstawiono zależność błędu względnego δ_{T_o} wyznaczania okresu T_o sygnału enkodera od prawdopodobieństwa pojawienia się anomalii. Natomiast rysunek 5 przedstawia wpływ wielkości zakłóceń (modelowanych przez wielkość mnożnika γ_o) na błąd względną estymacji okresu T_o .



Rys.4. Zależność względnego błędu wyznaczania okresu T_o sygnału enkodera od prawdopodobieństwa pojawienia się anomalii (przy $\gamma_o=20$)



Rys.5. Wpływ wielkości zakłóceń (modelowanych przez wielkość mnożnika γ_o) na błąd względną estymacji okresu T_o (przy $P^{zo}=0,1$)

Jak wynika z rezultatów badań przedstawionych na rysunku 4 metoda oparta o zliczanie nie jest odporna na pojawienie się pomiarów anomalnych, natomiast proponowana metoda pozwala na uzyskanie wiarygodnych estymat T_o nawet w przypadku dużej intensywności zakłóceń (błąd względny 2,8% przy prawdopodobieństwie wystąpienia anomalii $P^{zo} = 0,5$). Zalety proponowanego algorytmu potwierdzają również wyniki przedstawione na rysunku 5, z których wynika, że jest on odporny na zakłócenia w szerokim zakresie ich wartości, w przeciwieństwie do metody powszechnie stosowanej.

Podsumowanie

Celem realizowanych badań było opracowanie algorytmu przetwarzania sygnałów pochodzących z enkodera, który jest elementem systemu regulacji prędkości i pracuje w warunkach silnych zakłóceń elektromagnetycznych. Proponowana metoda wykorzystuje estymację nieliniową i testowanie hipotez opisujących stan kanału pomiarowego. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły poprawność pracy proponowanego algorytmu w warunkach zakłóceń oraz jego przewagę nad stosowaną w urządzeniu metodą polegającą na zliczaniu zboczy sygnału enkodera. Niewygodowane obciążenie obliczeniowe proponowanej metody pozwala na implementację algorytmu na mikrokontrolerze, dzięki czemu nadaje się on do wykorzystania przy budowie sieci inteligentnych sensorów pracujących w warunkach przemysłowych i narażonych na różnorodne zakłócenia.

Autorzy chcieliby wyrazić specjalne podziękowania firmie PROMOTECH za współpracę i udostępnienie wózka spawalniczego do badań laboratoryjnych.

LITERATURA

- [1] Sadowski M., Holiczer A., Malinowski G., Electromagnetic disturbances in industrial welding processes, *XXIII International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 9-11 September, 2015, Białystok, 136-139
- [2] Holiczer A., Grishin Yu., Measurement process parameter estimation robust with respect to pulse interferences and noise, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), 28-29
- [3] Gupta M., Gao J., Aggarwal C., Han J., Outlier Detection for Temporal Data: A Survey, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 25, (2014), no. 1, 2250-2267
- [4] Aggarwal C. C., *Outlier Analysis*, Springer, 2013
- [5] Grishin Yu., Janczak D., A detection-estimation method for systems with random jumps with application to target tracking and fault diagnosis, *Nonlinear dynamics*, Ed. Evans T., Intech, 2010
- [6] Pires J. N., Loureiro A., Bölsjö G., *Welding Robots: Technology, System Issues and Application*, Springer-Verlag London Limited, 2006
- [7] Matson M., *CNC Programming: Principles and Applications*, Cengage Learning, Inc, Delmar 2010
- [8] Janczak D., An adaptive algorithm of state estimation in the presence of multiplicative interference, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), 30-31
- [9] Janczak D., Grishin Yu., State estimation of linear dynamic system with unknown input and uncertain observation using dynamic programming, *Control and Cybernetics*, 35 (2006), 851-862
- [10] Kay S., *Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory*, Prentice-Hall, 1993

Autorzy: dr inż. Dariusz Janczak, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok, E-mail: d.janczak@pb.edu.pl; dr inż. Andrzej Holiczer, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok, E-mail: a.holiczer@pb.edu.pl.