

Ocena możliwości wykorzystania oscylacyjnego rozładowania energii cewki w algorytmie pomiarowym impulsowego przepływomierza elektromagnetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono dyskusję możliwości wykorzystania w algorytmie pomiarowym przepływomierza elektromagnetycznego energii oddawanej przez cewkę w procesie impulsowego pobudzenia. Jego celem było zbadanie wpływu wartości pojemności w proponowanym układzie rozładowania na wyniki szacowania prędkości przepływu cieczy.

Abstract. The paper presents the discussion on the possibility to improve the measuring algorithm with the use of the energy dissipated by the coil during the process of its pulse excitation. The main objective was to check the influence of the value of the capacity in the proposed circuit responsible for the energy dissipation on the results of flow velocity estimation. The possibility to improve the measuring algorithm in electromagnetic flowmeter with the use of the energy dissipated by the coil during the process of its pulse excitation

Słowa kluczowe: pomiary przepływu, przetwornik elektromagnetyczny.

Keywords: flow measurement, electromagnetic sensor.

Wstęp

Przepływomierze elektromagnetyczne, ze względu na swoje unikatowe zalety, z których najważniejszą jest możliwość pomiaru średniej prędkości przepływu w kanale gwarantująca wysoką odporność na przepływy turbulenty, stanowią cenną alternatywę dla wielu dziedzin przemysłu i gospodarki. Obserwowany brak ich dominacji na rynku systemów pomiaru przepływu rozproszonych terytorialnie, które z konieczności zasilane są ze źródeł odnawialnych, jest powodowany stosunkowo wysokim zapotrzebowaniem na energię niezbędną do generacji pola magnetycznego. Ze względu na fakt, że sygnał pomiarowy jest silnie zakłócony, przede wszystkim przez wolnozmiennie zakłócenia elektrochemiczne, naturalnym sposobem zwiększenia stosunku sygnał – szum i tym samym poprawy niepewności pomiaru jest zwiększenie indukcji pola magnetycznego. W powszechnie stosowanych rozwiązaniach, gdzie stosunkowo proste algorytmy pomiarowe wymagają zastosowania do pobudzenia przebiegów okresowych w stanie ustalonym [1], pociąga to za sobą zwiększenie ilości energii dostarczanej do obwodu wzbudzenia. Niniejszy artykuł stanowi kontynuację prac [2][3], w których celem ograniczenia zużycia energii elektrycznej pobieranej przez przepływomierz elektromagnetyczny, proponuje się zastosowanie impulsowego zasilania obwodu wzbudzenia w połączeniu z odpowiednim algorytmem przetwarzania uzyskanego tym sposobem sygnału pomiarowego. Zaprezentowano w nim wyniki badań wpływu częstotliwości oscylacyjnego rozładowania energii cewki na proces szacowania prędkości przepływu z wykorzystaniem przetwarzania sygnału wyjściowego opartego na metodzie najmniejszych kwadratów.

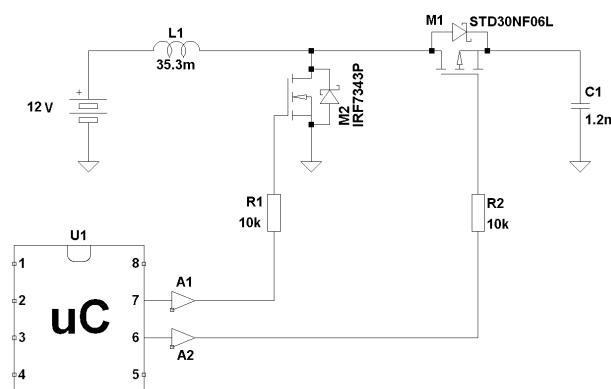
Problem badawczy

Zasada działania elektromagnetycznego przetwornika przepływu oparta jest na zjawisku Faradaya [1]. W przewodzącej cieczy, przepływającej w polu magnetycznym, powstaje różnica potencjałów, która jest proporcjonalna do wartości indukcji pola magnetycznego B , średniej prędkości poruszającej się cieczy v oraz do odległości między punktami pomiarowymi (elektrodami) l .

$$(1) \quad U \sim v \cdot B \cdot l$$

Istotnymi czynnikami wpływającymi na dokładność pomiaru są kształt oraz wielkość strumienia magnetycznego

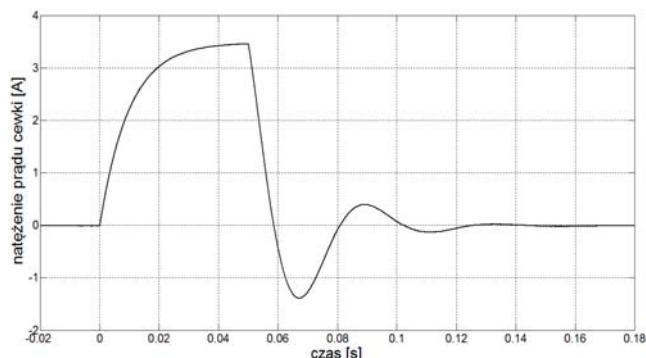
w kanale pomiarowym oraz odpowiednio dobrany algorytm przetwarzania sygnałów. Z badań opublikowanych w [2] wynika, że pobudzenie impulsowe przetwornika może być zrealizowane w prostym układzie impulsowym z jednym kluczem. Dzięki zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów, możliwe jest oszacowanie parametrów przepływu cieczy w czasie trwania narastającego zbocza prądu w obwodzie wzbudzenia. Nie dotyczy to jednak fazy rozładowania energii zgromadzonej w cewce. Prąd rozładowania zmienia się wówczas zgodnie z zależnością $e^{-\alpha t}$ (gdzie α oznacza stałą czasową cewki). Jego pochodna, będąca źródłem tzw. efektu transformatorowego [2], ma w sposób oczywisty ten sam, eksponencyjny kształt. Przyczynia się to do powstania sygnału wyjściowego, w którym wydzielenie i przetwarzanie sygnału niosącego informację o prędkości nie jest możliwe. Tym samym zachodzi konieczność zastosowania takiego układu kluczującego, aby wymusić inny niż eksponencyjny kształt prądu rozładowania. Zaproponowana w [3] modyfikacja w układzie zasilania polega na dołączeniu do obwodu, dodatkowego kondensatora $C1$ (rys. 1), który wymusi tłumione rozładowanie oscylacyjne w klasycznym obwodzie RLC. Załączenie tranzystora $M2$ rozpoczyna dostarczanie energii z ogniwa elektrochemicznego (np. o napięciu nominalnym 12V), do cewki przepływomierza $L1$.



Rys. 1. Schemat ideowy propozycji obwodu wzbudzenia przepływomierza elektromagnetycznego gwarantujący oscylacyjny charakter procesu rozładowania energii cewki.

Po czasie odpowiadającym kilku jej stałym czasowym (np. 50ms), następuje zablokowanie $M2$ a energia

zgrupowana w L1 spowoduje przepływ prądu, przez diodę zintegrowaną w tranzystorze M1 do kondensatora C1, przyczyniając się do wzrostu napięcia na jego okładzinach. Załączenie tranzystora M1 umożliwi oscylacyjną wymianę energii pomiędzy cewką a dołączonym kondensatorem. Na rys. 2 pokazany jest przebieg rzeczywistego prądu w cewce przepływomierza uzyskany w omawianym układzie dla przypadku, gdy wartość dołączonej pojemności wynosi 1,2mF.



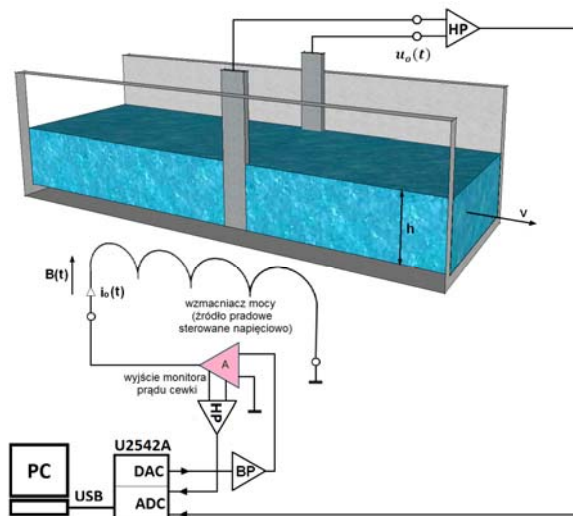
Rys. 2. Przykładowy przebieg prądu w cewce przepływomierza.

Powstaje w tym miejscu pytanie o optymalną wartość pojemności C1, czyli tym samym pytanie o częstotliwość oscylacji prądu rozładowania. Charakter występujących w przepływomierzu szumów typu $1/f$ pozwala przypuszczać, że im większa będzie częstotliwość oscylacji, tym mniejszą uda się osiągnąć niepewność pomiaru. Należy jednak pamiętać o tym, że w przetworniku tym zachodzi szereg innych zjawisk mogących w pewnych warunkach mieć istotny wpływ na wynik pomiaru. Pierwszym z nich jest wspomniany wcześniej efekt transformatorowy, którego intensywność rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości i może przekroczyć dostępny zakres przetwarzania. Niezależnie od tego, zmienne pole magnetyczne powoduje powstawanie prądów wirowych w kanale. Im wyższa częstotliwość indukcji magnetycznej, tym większa amplituda generowanych prądów. Przepływ prądów wirowych w elektrolicie powoduje również wystąpienie zjawiska polaryzacji, które zaburza stan równowagi elektrochemicznej. Czas powrotu procesów elektrochemicznych, po zaniku prądów wirowych, do poprzedniego stanu równowagi jest zależny od konkretnego środowiska. Minimalizacja wpływu tego typu zakłóceń, może wymagać zastosowanie pobudzeń o jak najmniejszej częstotliwości [4].

Badania eksperymentalne

W procesie poszukiwania optymalnej wartości pojemności C1 przeprowadzono badania eksperymentalne, mające na celu oszacowanie wpływu częstotliwości oscylacji na wyznaczenie parametrów przepływu metodą najmniejszych kwadratów. Badania te polegały na zasilaniu cewki przepływomierza prądem o oscylacjach odpowiadających różnym wartościom pojemności C1, a następnie na analizie uzyskanych sygnałów. Do generacji przebiegu testującego oraz rejestracji pomiarów zastosowano moduł akwizycji danych U2542 firmy Agilent. Przebiegi testujące zostały wytworzone w środowisku MATLAB i przesłane do modułu U2542A. Charakter kształtu generowanego prądu był analogiczny do tego z rys. 2. Czas trwania zbrocza narastającego wynosił 50ms a częstotliwość oscylacji odpowiadających rozładowaniu energii zmieniała się w zakresie od 5 do 155Hz. Wyjście analogowe modułu akwizycji danych zostało podłączone poprzez filtr pasmowo przepustowy o dolnej częstotliwości odcięcia 0,1Hz i górnej

1kHz, którego zadaniem było odfiltrowanie szumów kwantyzacji przetwornika C/A. Do dwóch kanałów wejściowych modułu akwizycji danych podłączono odpowiednio sygnał napięciowy z elektrod pomiarowych oraz sygnał z monitora prądu wzmacniacza prądowego sterowanego napięciowo. Sygnał wyjściowy z elektrod przepuszczony został przez filtr górnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 0,48Hz, którego zadaniem była minimalizacja wolnozmiennych sygnałów zakłócających pochodzenia elektrochemicznego. Identyczny filtr zastosowano w torze pomiaru prądu po to, by rejestrowany sygnał miał to samo opóźnienie i zniekształcenia co napięcie pochodzące z elektrod. Pomiar wykonano dla kilku różnych wysokości napełnienia kanału i dla różnych prędkości przepływu, w tym dla wody stojącej (przypadek prędkości $v=0$). Szczegółowy schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat zestawionego układu pomiarowego.

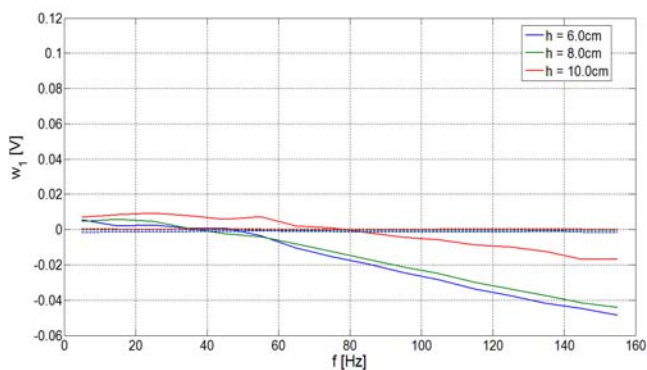
Wyniki badań i wnioski

Napięcie generowane na elektrodach pomiarowych jest opisane liniową kombinacją dwóch składowych [1][2]: składowej o kształcie prądu i składowej o kształcie pochodnej prądu (od efektu transformatorowego)

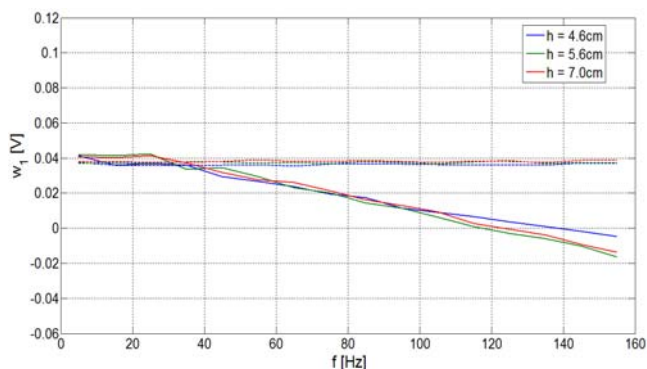
$$(2) \quad u_o(t) = w_1 \cdot i_o(t) + w_2 \cdot \frac{di_o(t)}{dt}.$$

Współczynniki tej kombinacji w_1 oraz w_2 zawierają kolejno informację o prędkości przepływu oraz o intensywności efektu transformatorowego i z uwagi na liniowość modelu (2) mogą być wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów [5][6].

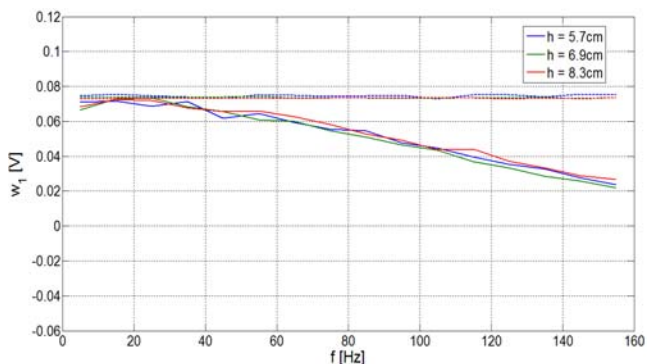
Wyniki oszacowania prędkości przepływu, w zależności od częstotliwości oscylacji przedstawiono na rysunkach od 4 do 7. Celem uzyskania czytelnej ilustracji wpływu prędkości na wartość współczynnika w_1 , wszystkie wykresy sporządzone zostały w jednakowych układach współrzędnych. Analizę przeprowadzono osobno dla zbrocza narastającego (linie przerywane na wykresach) i dla tej części przebiegu, która zawierała oscylacje (linie ciągłe). Analizując przedstawione wykresy można zaobserwować, że wraz ze wzrostem częstotliwości oscylacji, powiększa się rozbieżność pomiędzy wynikami estymacji prędkości dla obu fragmentów przebiegu. Należy zauważyć, że dla każdego z nich pomiary wykonywane były przy stałej prędkości przepływu cieczy, w obecności niemal tych samych zakłóceń, więc wyniki oszacowań powinny być zbliżone.



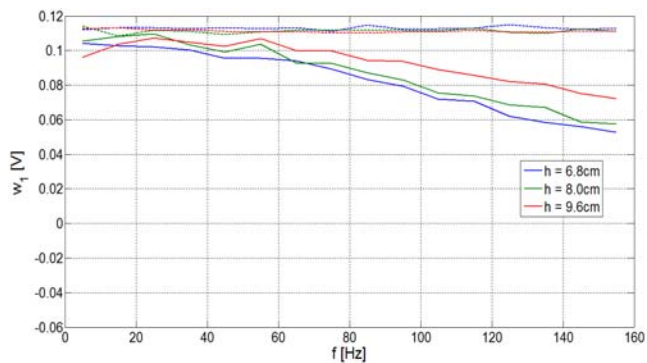
Rys. 4. Wpływ częstotliwości oscylacyjnego rozładowania energii na oszacowanie prędkości przepływu dla wody stojącej ($v = 0$) przy różnej wysokości napełnienia kanału.



Rys. 5. Wpływ częstotliwości oscylacyjnego rozładowania energii na oszacowanie prędkości przepływu dla wody płynącej z prędkością 5cm/s przy różnej wysokości napełnienia kanału.



Rys. 6. Wpływ częstotliwości oscylacyjnego rozładowania energii na oszacowanie prędkości przepływu dla wody płynącej z prędkością 10cm/s przy różnej wysokości napełnienia kanału.



Rys. 7. Wpływ częstotliwości oscylacyjnego rozładowania energii na oszacowanie prędkości przepływu dla wody płynącej z prędkością 15cm/s przy różnej wysokości napełnienia kanału.

Przyczyny powstania obserwowanej rozbieżności można wytłumaczyć indukowaniem się w przewodzącej cieczy prądów wirowych, których amplituda rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości zmian pola magnetycznego. Zgodnie z regułą Lentza, prąd wirowy generuje pole magnetyczne przeciwdziałające zmianom pola, które ten prąd wytworzyło. W konsekwencji – im wyższa częstotliwość zmian pola, tym mniejszy wypadkowy strumień magnetyczny w kanale pomiarowym. Z punktu widzenia uzyskania rozwiązania niskoenergetycznego, oznacza to konieczność dodatkowego wydatkowanie energii na pokrycie strat powstających w środowisku.

Z tego względu wartość pojemności kondensatora C1 powinna być tak dobrana, by częstotliwość oscylacji w czasie rozładowania energii z cewki była na tyle mała, aby zaindukowane w kanale pomiarowym prądy wirowe nie wpływały znacząco na wynik oszacowania parametrów przepływu. Z przedstawionych badań wynika, że częstotliwość tych oscylacji nie powinna przekraczać kilku, kilkunastu herców.

Podsumowanie

Przedstawiony materiał ilustruje możliwości i warunki wykorzystania w algorytmie pomiarowym przepływomierza elektromagnetycznego fragmentu przebiegu wyjściowego, który odpowiada rozładowaniu energii cewki w procesie jej impulsowego pobudzenia. Przeprowadzone badania wykazały, że dobór odpowiedniej pojemności w torze rozładowania, która oferuje oscylacyjne rozładowanie energii musi być efektem osiągnięcia pewnego kompromisu pomiędzy koniecznością minimalizacji wpływu szumów elektrochemicznych a stratami wynikającymi z powstawania prądów wirowych w kanale pomiarowym.

Autorzy: dr hab. inż. Jacek Jakubowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych; E-Mail: jjakubowski@wat.edu.pl; mgr inż. Bogumił Brykalski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych; E-Mail: boqumil.brykalski@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Watral Z., Jakubowski J., Michalski A., Electromagnetic Flow Meters for Open Channels: Current State and Development Prospects, *Flow measurement and Instrumentation*, vol. 42, 2015, ss. 16-25.
- [2] Jakubowski J., Watral Z., Michalski A., The Problems of Pulse Excitation in Electromagnetic Flowmeters, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 16, nr 5, 2013, ss. 47-52.
- [3] Jakubowski J., Brykalski B., Michalski A., Wybrane aspekty analizy niepewności pomiaru w impulsowym przepływomierzu elektromagnetycznym, *Technika Transportu Szynowego*, vol. 10, 2013, ss. 3293-3302.
- [4] Michalski A., Wybrane problemy syntezy przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych, *Zeszyty naukowe Politechniki Warszawskiej - Elektrotechnika*, zeszyt 108, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [5] Michalski A., Jakubowski J., Analiza możliwości zastosowania metody najmniejszych kwadratów w algorytmie pomiarowym przepływomierza elektromagnetycznego dla kanału otwartego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5, 2008, ss. 126÷131.
- [6] Kay S. M., Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory, *Prentice-Hall, Inc. Henceforth*, 1993.