

Formowanie przebiegu czasowego pola magnetycznego w przepływomierzu elektromagnetycznym

Streszczenie. Artykuł przedstawia dyskusję problemu pomiaru prędkości przepływającej cieczy w kanale otwartym z wykorzystaniem metody elektromagnetycznej. Jego celem było opracowanie procedury kształtowania przebiegu czasowego pola magnetycznego, wymaganego przez przyjęty algorytm estymacji. Procedura uwzględniła obecność rzeczywistych układów w torze przetwarzania i oferuje możliwość wyznaczenia dowolnych kształtów składowych sygnału użytecznego.

Abstract. The paper presents some aspects of liquid flow measurement in open channel, with the use of electromagnetic method. The main objective was to work out a procedure to form the waveform of the magnetic field, required by the estimation algorithm. The presence of real components in the measurement system was taken into consideration. The resulting procedure provides the possibility to create any shape of the desired output signal. (A Procedure to Form the Waveform of the Magnetic Field in an Electromagnetic Flow Meter).

Słowa kluczowe: pomiary przepływu, przetwornik elektromagnetyczny, identyfikacja układu.

Keywords: flow measurement, electromagnetic sensor, system identification.

doi:10.12915/pe.2014.08.36

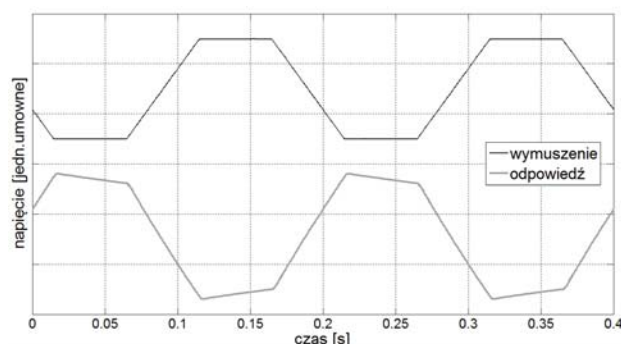
Wstęp

W wielu dziedzinach przemysłu oraz gospodarki wodnej, ze względu na specyfikę medium oraz występujące warunki, do pomiaru przepływu cieczy stosowane są przepływomierze elektromagnetyczne. Przetwornik taki wykorzystuje jako zasadę działania zjawisko Faradaya. Idea pomiaru polega na wyznaczeniu napięcia indukującego się na elektrodach zanurzonych w przewodzącej, przepływającej w obecności pola magnetycznego cieczy. Uzyskiwany w metodzie przebieg napięcia, niosący informację o parametrach przepływu, jest przebiegiem złożonym, zależnym od charakteru zmienności pola magnetycznego, intensywności występujących zakłóceń oraz właściwości układów wykorzystanych w torze pomiarowym. W celu ograniczenia niepewności pomiaru, istotne jest z jednej strony zastosowanie odpowiedniego algorytmu przetwarzania powstałego sygnału użytecznego a z drugiej – takie ukształtowanie samego sygnału, aby estymacja parametrów była możliwie efektywna [1].

Tradycyjna metoda szacowania parametrów przepływu polega na uzyskaniu przedziałów czasowych pola magnetycznego o stałej wartości pochodnej indukcji magnetycznej przy pomiarach wysokości napełnienia kanału (pole liniowe w czasie) oraz pole o zerowej pochodnej indukcji przy pomiarach prędkości przepływu (przedziały stałego pola). Podstawowy algorytm pomiarowy zakłada wówczas trapezowy kształt jednej ze składowych napięcia na elektrodach w stanie ustalonym i bazuje na wyznaczeniu wartości średnich w odpowiednich przedziałach czasu [2]. Z uwagi na ograniczone pasmo układu pobudzania, odpowiedzialnego za wytworzenie pola magnetycznego oraz obecność układu kondycjonowania, którego skuteczność jest tym lepsza, im większa jest częstotliwość graniczna filtra górnoprzepustowego ograniczającego obecność wolnozmiennych zakłóceń [3], uzyskanie trapezowej postaci odpowiedzi przy stosowaniu trapezowego wymuszenia odbywa się jednak w sposób jedynie przybliżony. Rysunek 1 przedstawia wyniki pomiarów w przepływomierzu laboratoryjnym składowej napięcia (odpowieź) pojawiającej się w stanie ustalonym w sygnale użytecznym przy trapezowym napięciu wymuszającym, podanym na wejście układu zadawania pola magnetycznego (źródło prądowe sterowane napięciowo).

Problem zapewnienia warunków do uzyskania wymaganej odpowiedzi w stanie ustalonym jest problemem wyznaczenia transmitancji widmowej i filtracji odwrotnej,

umożliwiającej uzyskanie wymuszenia przy zadanej odpowiedzi. W świetle powyższych uwarunkowań, celem niniejszej pracy jest opracowanie opisu matematycznego toru przetwarzania sygnału rzeczywistego przetwornika, bazującego na rachunku operatorowym, który wskaże stosowną funkcję przenoszenia i określi warunki i postać układu pomiarowego do przeprowadzenia eksperymentów celem jej wyznaczenia i praktycznego wykorzystania.



Rys. 1. Postać odpowiedzi przy trapezowym wymuszeniu

Opis układu przetwornika idealnego

Sygnał wyjściowy w idealnym przepływomierzu elektromagnetycznym (rysunek 2), powstający na elektrodach pomiarowych, zawiera w warunkach braku zakłóceń dwie składowe [4]. Pierwszą jest sygnał proporcjonalny do prędkości przepływu cieczy, który może być opisany następującą zależnością:

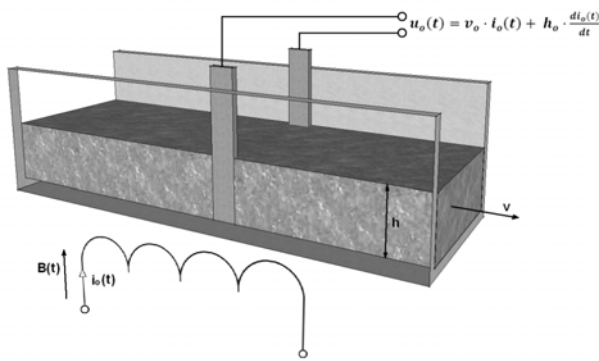
$$(1) \quad u_v(t) = v \cdot c_v \cdot B(t) = w_v \cdot B(t),$$

gdzie: v – prędkość przepływu cieczy w kanale przepływowym, c_v – stała konstrukcyjna, $B(t)$ – indukcja pola magnetycznego.

Składowa druga to sygnał kształtowany przez tzw. efekt transformatorowy, który przenosi informację o wysokości napełnienia kanału. Jej istnienie jest warunkowane zmiennością czasową pola magnetycznego według następującej zależności:

$$(2) \quad u_h(t) = h \cdot c_h \cdot \frac{dB(t)}{dt} = w_h \cdot \frac{dB(t)}{dt},$$

gdzie: h – wysokość napełnienia kanału przepływowego, c_h – stała konstrukcyjna, $B(t)$ – indukcja pola magnetycznego.



Rys. 2. Postać fizyczna przetwornika idealnego.

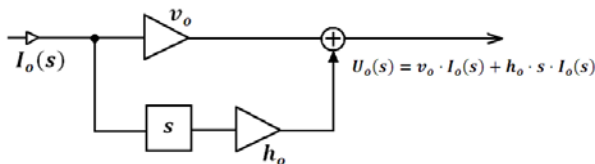
Sygnał wypadkowy jest liniową kombinacją obu składowych:

$$(3) \quad u_o(t) = w_v \cdot B(t) + w_h \cdot \frac{dB(t)}{dt}.$$

Współczynniki tej kombinacji, w_v i w_h przenoszą informację o poszukiwanych parametrach przepływu. Ponieważ wartość indukcji magnetycznej w cewce powietrznej jest wprost proporcjonalna do wartości prądu odpowiedzialnego za wytworzenie pola magnetycznego $B(t) \sim i_o(t)$, to sygnał pomiarowy można równocześnie wyrazić jako:

$$(4) \quad u_o(t) = v_o \cdot i_o(t) + h_o \cdot \frac{di_o(t)}{dt},$$

gdzie: v_o – współczynnik liczbowy proporcjonalny do prędkości przepływu cieczy, h_o – współczynnik liczbowy proporcjonalny do wysokości napełnienia kanału. Schemat zastępczy przetwornika opisanego powyższym równaniem wraz z opisem operatorowym przedstawia rys. 4.



Rys. 3. Schemat zastępczy przetwornika idealnego wraz z opisem operatorowym napięcia wyjściowego.

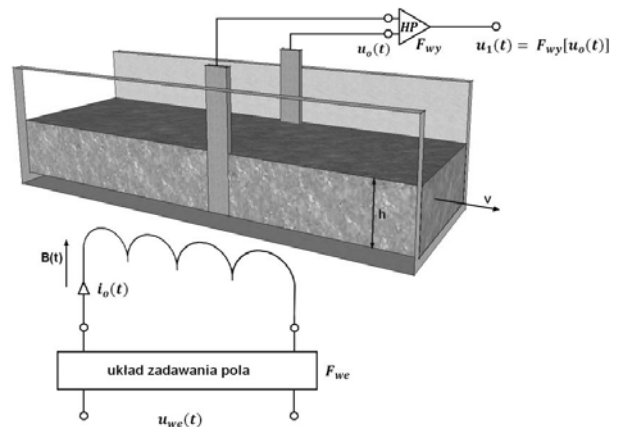
Z przedstawionych zależności wynika, że w idealnym przetworniku kształt przebiegu czasowego składowej napięcia na elektrodach jest zgodny z kształtem wytwarzanego pola magnetycznego. Z tego powodu, jeżeli algorytm pomiarowy wymaga uzyskania konkretnego kształtu napięcia wyjściowego, to należy wytworzyć taki sam przebieg czasowy prądu cewki wzbudzającej.

Opis układu przetwornika rzeczywistego

W przeciwieństwie do układu idealnego, w przetworniku elektromagnetycznym rzeczywistym (rysunek 4) występuje konieczność zastosowania układu zadawania pola zawierającego wzmacniacz mocy o ograniczonym paśmie wraz z filtrem wygładzającym dla sygnału sterującego, pochodzącego z przetwornika C/A oraz konieczność zastosowania układu filtracji zakłóceń wolnozmiennych. W efekcie, w układzie rzeczywistym prąd w obwodzie wzbudzenia cewki należy opisać zależnością:

$$(5) \quad i_o(t) = F_{we}[u_{we}(t)] \rightarrow I_o(s) = H_{we}(s) \cdot U_{we}(s),$$

gdzie: F_{we} – operator przetwarzania dla układu zadawania pola, reprezentowany przez transmitancję operatorową $H_{we}(s)$, $u_{we}(t)$ – napięcie wymuszające przepływ prądu, podawane z przetwornika C/A.

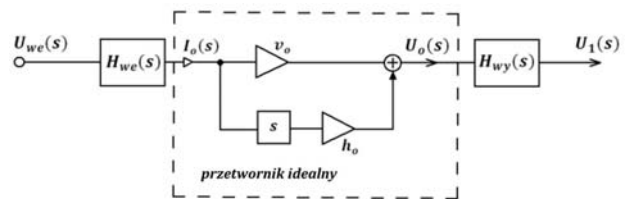


Rys. 4. Budowa rzeczywistego przetwornika.

Dostępne pomiarowo napięcie użyteczne za filtrem górnoprzepustowym przyjmuje postać:

$$(6) \quad u_1(t) = F_{wy}[u_o(t)] \rightarrow U_1(s) = H_{wy}(s) \cdot U_o(s),$$

gdzie: F_{wy} – operator przetwarzania dla filtru górnoprzepustowego, minimalizującego wpływ zakłóceń wolnozmiennych, $H_{we}(s)$ – transmitancja operatorowa filtru. Schemat zastępczy powstałej modyfikacji układu przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat zastępczy przetwornika rzeczywistego.

Podstawiając do (6) zależność (4), uzyskuje się następującą postać równania charakteryzującego napięcie wyjściowe w przetworniku rzeczywistym:

$$(7) \quad u_1(t) = v_o \cdot F_{wy}\{F_{we}[u_{we}(t)]\} + h_o \cdot \frac{dF_{wy}\{F_{we}[u_{we}(t)]\}}{dt}.$$

W dalszej analizie wygodnie jest przyjąć oznaczenie:

$$(8) \quad i_1(t) = F_{wy}\{F_{we}[u_{we}(t)]\} \rightarrow I_1(s) = H_{wy}(s)H_{we}(s)U_{we}(s),$$

opisujące sygnał zastępczy, który można określić jako efekt przetwarzania dostępnego pomiarowo pobudzenia $u_{we}(t)$ przez wzmacniacz mocy, filtr wygładzający dla układu C/A oraz filtr górnoprzepustowy. Dzięki temu oznaczeniu można układ przetwornika rzeczywistego sprowadzić do układu przetwornika idealnego, opisanego formalnie równaniem, w którym prąd $i_1(t)$ zajmuje miejsce prądu $i_o(t)$ (por. wzór (4)):

$$(9) \quad u_1(t) = v_o \cdot i_1(t) + h_o \cdot \frac{di_1(t)}{dt}.$$

Problem badawczy

Z zależności (7) wynika, że w przetworniku rzeczywistym kształt składowej napięcia użytecznego, przenoszącej informację o prędkości nie jest taki sam, jak kształt prądu wytwarzającego pole magnetyczne. Ponadto

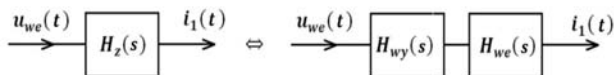
samo pole magnetyczne nie ma takiego kształtu jak sygnał sterujący $u_{we}(t)$. Prąd $i_f(t)$, opisany równaniem (8), w obwodzie wzbudzenia pola w rzeczywistości nie płynie (fizycznie płynie $i_o(t)$), ale kształtuje napięcie $u_f(t)$ na wyjściu koniecznego do zastosowania filtra górnoprzepustowego w taki sam sposób, w jaki prąd $i_o(t)$ kształtuje napięcie $u_o(t)$ w przetworniku idealnym. Jeżeli algorytm przetwarzania wymaga trapezowego kształtu jednej ze składowych napięcia wyjściowego, to prąd $i_f(t)$ powinien taki kształt przyjmować. Prąd $i_f(t)$ jest więc w pewnym sensie prądem wirtualnym, którego postać bezpośrednio kształtuje wymaganą postać napięcia wyjściowego przetwornika rzeczywistego. Przebieg tego prądu można dobrać do postaci dogodnej z punktu widzenia przetwarzania sygnału $u_f(t)$ poprzez dobór rzeczywistego napięcia pobudzającego $u_{we}(t)$ zgodnie z zależnością:

$$(10) \quad U_{we}(s) = H_z^{-1}(s) \cdot I_1(s),$$

gdzie: $H_z(s) = H_{wy}(s) \cdot H_{we}(s)$ – transmitancja zastępcza układu przetwornika. Zadaniem podstawowym jest, w ogólnym przypadku, wyznaczenie transmitancji operatorowej $H_z(s)$. Dla przypadku stanu ustalonego wystarczająca jest znajomość transmitancji widmowej $H_z(j\omega) = H_z(s)|_{s=j\omega}$. Dzięki niej można wyznaczyć takie pobudzenie $u_{we}(t)$, aby napięcie na wyjściu filtra $u_f(t)$ miało z góry ustalony kształt.

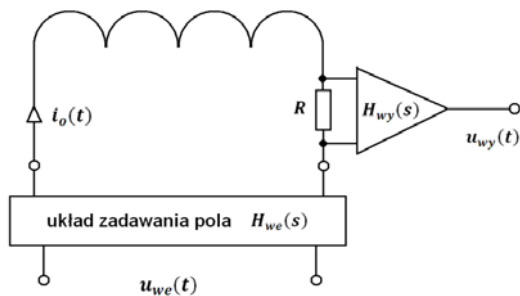
Metoda badawcza

Procedura wyznaczania poszukiwanej transmitancji widmowej, to zadanie identyfikacji układu, przedstawionego na rysunku 6, w którym należy zapewnić pomiarowy dostęp do sygnałów $u_f(t)$ oraz $i_f(t)$.



Rys. 6. Blokowy schemat identyfikowanego układu.

Celem uzyskania dostępu do sygnału $i_f(t)$, do układu zadawania pola należy podłączyć filtr górnoprzepustowy o budowie identycznej z budową układu kondycjonowania (blok HP na rys. 4), poprzez rezystor R tak, jak to zostało pokazane na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia poszukiwanej transmitancji widmowej.

Napięcie wyjściowe w takim układzie jest równe:

$$(11) \quad U_{wy}(s) = I_o(s) \cdot R \cdot H_{wy}(s) = R \cdot U_{we}(s) \cdot H_z(s).$$

Transmitancja operatorowa może być więc zapisana jako:

$$(12) \quad H_z(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} \cdot A,$$

gdzie: $A = 1/R$. Oznacza to, że na podstawie dostępnych pomiarowo napięć $u_{we}(t)$ oraz $u_{wy}(t)$, można (z dokładnością do stałej) wyznaczyć poszukiwaną transmitancję widmową.

Badania eksperymentalne

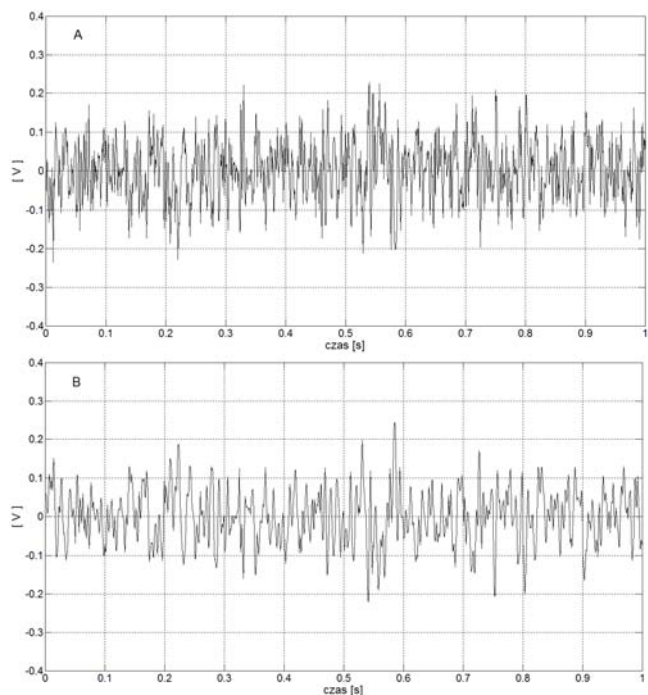
W procesie identyfikacji poszukiwanej wersji widmowej transmitancji (12) zastosowano metodę nieparametryczną z wymuszeniem w postaci szumu białego. Formalną podstawą metody jest równanie Wienera-Hopfa z zakresu identyfikacji [5], opisujące funkcję korelacji wzajemnej $R_{xy}(\tau)$ pomiędzy odpowiedzią a wymuszeniem za pomocą splotu autokorelacji wymuszenia $R_{xx}(\tau)$ z odpowiedzią impulsową $h(\tau)$:

$$(13) \quad R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau - t)h(t)dt.$$

Przy zapewnieniu funkcji autokorelacji sygnału wymuszającego w postaci delty Diraca (szum biały), przebieg korelacji wzajemnej w wyniku splotu otwiera postać odpowiedzi impulsowej. W praktyce [6] wykorzystuje się częstotliwościowy odpowiednik równania (13), który transmitancję widmową $H(f)$ określa na podstawie widmowej gęstości mocy wymuszenia $P_{xx}(f)$ i wzajemnej widmowej gęstości mocy wymuszenia i odpowiedzi $P_{yx}(f)$:

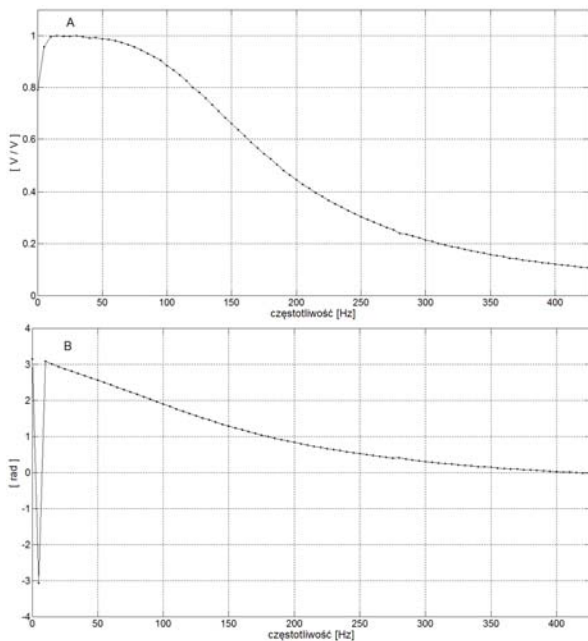
$$(14) \quad H(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)}.$$

Do generacji przebiegu testującego oraz rejestracji odpowiedzi w układzie pomiarowym z rys. 7 zastosowano moduł USB akwizycji danych U2542 firmy Agilent. Wykorzystane do obliczeń przebiegi przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Sygnały wykorzystane w identyfikacji transmitancji widmowej układu z rysunku 8: A – wymuszenie, B - odpowiedź.

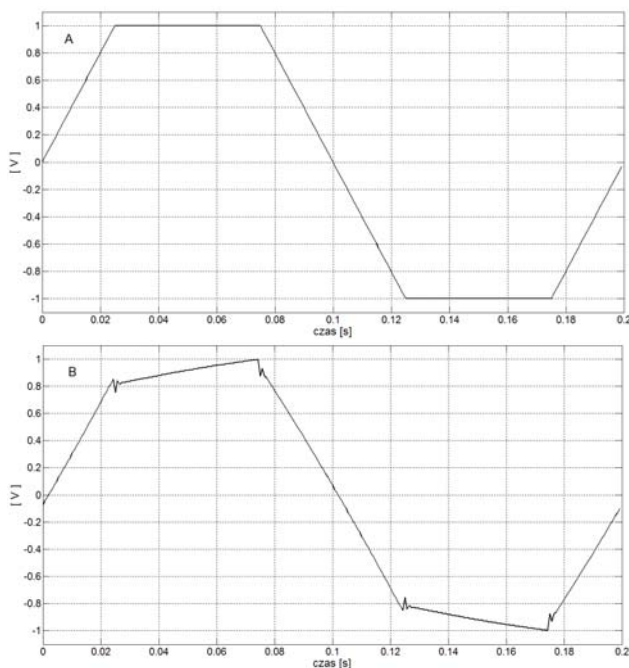
Częstotliwość próbkowania oraz wymiar dyskretnej transformaty Fouriera użytej do wyznaczenia widmowych gęstości mocy (14) zostały tak dobrane, aby możliwe było określenie transmitancji widmowej dla częstotliwości harmonicznych sygnału wykorzystywanego w praktyce, czyli 5Hz. Wyniki identyfikacji przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Wyniki identyfikacji transmitancji widmowej układu z rys. 7. Oznaczenia: A – unormowana charakterystyka amplitudowa, B – charakterystyka fazowa.

Wyznaczona transmitancja widmowa, przy znajomości transformaty Fouriera sygnału pożądanego umożliwia określenie transformaty Fouriera odpowiadającego mu wymuszenia:

$$(15) \quad U_{we}(j\omega) = H_z^{-1}(j\omega) \cdot U_{wy}(j\omega).$$

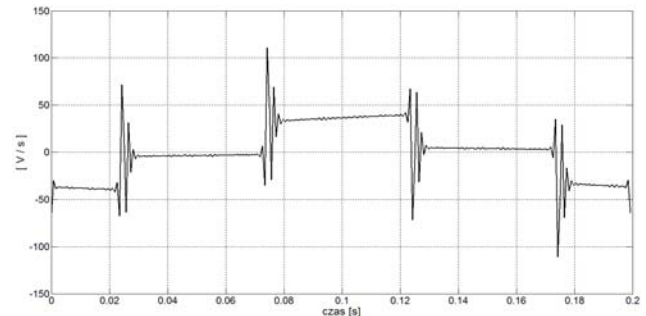


Rys. 10. Wymagana postać sygnału wyjściowego (A) i wyznaczony dla niego sygnał pobudzający (B).

Postać czasową zapewnia wówczas transformata odwrotna widma $U_{we}(j\omega)$. Przy założeniu, że sygnałem wyjściowym ma być sygnał trapezowy (rys. 10.A), uzyskany tym sposobem sygnał wymuszający został przedstawiony na rys. 10.B.

Finalnym zadaniem jest sprawdzenie spełnienia wymagań narzucanych na sygnał pobudzający przez układ

zadawania pola, który charakteryzuje się pewną dopuszczalną szybkością zmian napięcia sterującego.



Rys. 11. Szybkość zmian napięcia sterującego dla układu zadawania pola.

W omawianym eksperymencie do wytworzenia pola użyte zostało źródło prądowe sterowane napięciowo, dla którego górna granica dU/dt sygnału sterującego wynosi 2500V/s. Szybkość zmian wypracowanego napięcia sterującego, (rys. 10.B), ilustruje rysunek 11. Wynika z niego, że dU/dt wyznaczonego pobudzenia nie przekracza 150V/s i jest dużo poniżej limitu użytego źródła prądowego.

Podsumowanie

Przedstawiony materiał ilustruje możliwość wyznaczenia kształtu sygnału pobudzającego przetwornik elektromagnetyczny, w taki sposób, aby na wyjściu uzyskać wymaganą postać napięcia pomiarowego, ułatwiając obliczanie parametrów przepływu. Przeprowadzone badania pozwoliły na identyfikację transmitancji widmowej układu przetwornika, uwzględniając obecność układu pobudzania oraz układu kondycjonowania. Otrzymana w ten sposób transmitancja i zastosowanie procedury filtracji odwrotnej umożliwiają wyznaczenie dowolnych kształtów składowych sygnału użytecznego. Dla przypadku rozpatrywanego przebiegu trapezowego, uzyskana średniokwadratowa różnica pomiędzy wymaganym, a uzyskanym przebiegiem nie przekroczyła wartości 1% wartości skutecznej.

LITERATURA

- [1] S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing, Prentice Hall PTR, 1993.
- [2] Bonfig K., New developments in magnetic flow measurement in partly filled open channels, Proceeding of the IMEKO Congress, 1982, ss. 131-139.
- [3] J. Jakubowski, A. Michalski, Estimation of flow velocity in open channels with the use of electromagnetic flowmeter and neural network, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87 NR 5/2011, ss. 54-58.
- [4] A. Michalski, Wybrane problemy syntezy przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych, Zeszyty naukowe Politechniki, Warszawskiej - Elektrotechnika, zeszyt 108, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [5] T. Söderström, P. Stoica, System Identification, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1989.
- [6] The MathWorks, Signal Processing Toolbox, http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/signal/signal_tb.pdf

Autorzy: prof. dr hab. inż. Andrzej Michalski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych; E-Mail: anmi@iem.pw.edu.pl; 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: bogumil.brykalski@wat.edu.pl