

BRYKALSKI Bogumił, JAKUBOWSKI Jacek, MICHALSKI Andrzej

## WYBRANE ASPEKTY ANALIZY NIEPEWNOŚCI POMIARU W IMPULSOWYM PRZEPIYWOMIERZU ELEKTROMAGNETYCZNYM

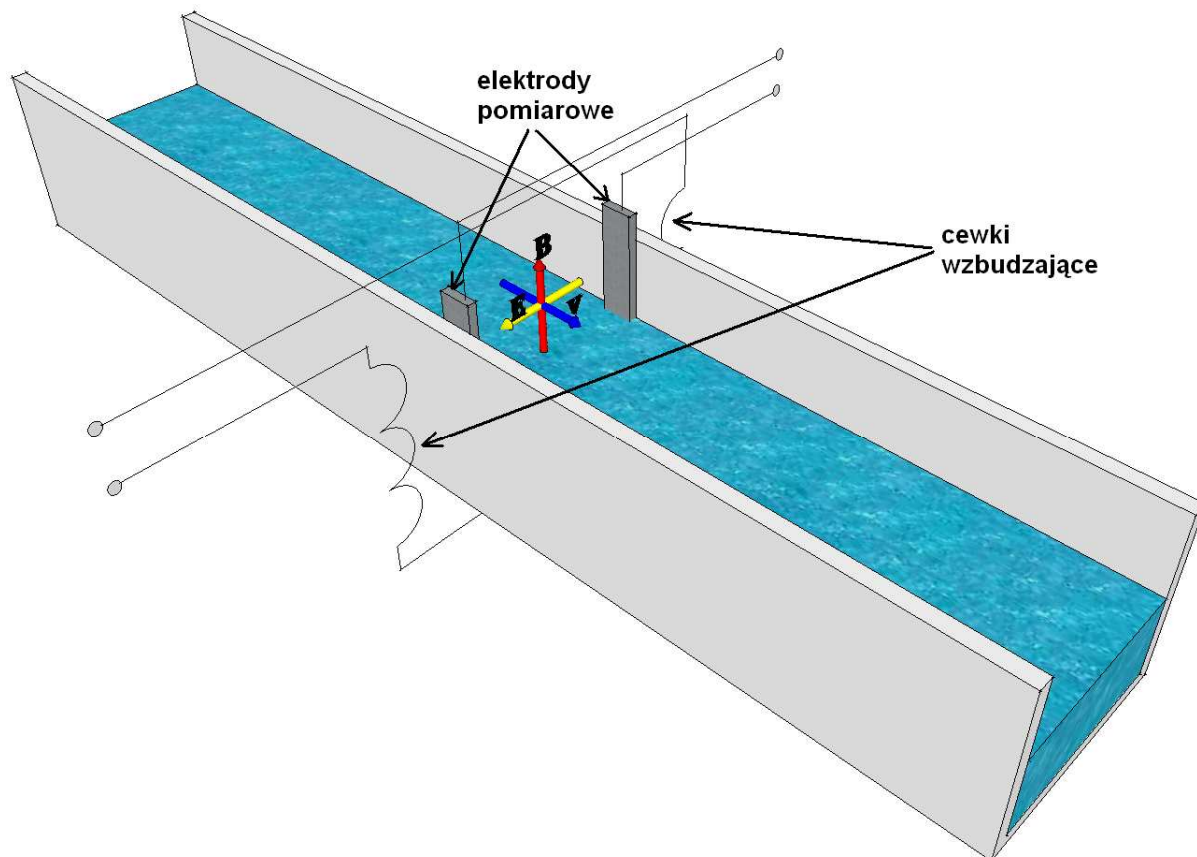
### *Streszczenie*

*Artykuł prezentuje możliwość wykorzystania metody najmniejszych kwadratów do pomiaru przepływu cieczy w przepływomierzu elektromagnetycznym zasilanym impulsowo. Pobudzenie impulsowe ma na celu znaczne ograniczenie zapotrzebowania energetycznego przepływomierza, nie zmniejszając przy tym niepewności pomiaru.*

### WSTĘP

Przepływomierz elektromagnetyczny jest urządzeniem, w którym metoda pomiaru przepływającej cieczy, oparta jest na prawie Faradaya. Zgodnie z tym prawem, w każdym przewodzącym medium, poruszającym się w polu magnetycznym, indukuje się pole elektryczne, którego kierunek jest prostopadły zarówno do pola magnetycznego jak i do wektora prędkości mierzzonego medium (rys. 1). Zanurzając na brzegach kanału pomiarowego dwie elektrody i wytwarzając w tym kanale jednorodne pole magnetyczne, można dokonać pomiaru prędkości przepływu elektrycznie przewodzącej cieczy. Różnica potencjałów jaka wówczas powstanie na elektrodach będzie proporcjonalna do wartości indukcji pola magnetycznego  $B$ , średniej prędkości poruszającej się cieczy  $v$  oraz do odległości między elektrodami  $l$ :

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



**Rys. 1** Schemat przepływomierza elektromagnetycznego w kanale otwartym.

Przepływomierze elektromagnetyczne, pomimo swoich podstawowych wad, takich jak wysokie zapotrzebowanie energetyczne oraz wysoka cena przetwornika pierwotnego, dzięki niekwestionowanym zaletom są nadal stosowane i rozwijane m.in. w przemyśle i w systemach zarządzania gospodarką wodną. Do podstawowych zalet przetworników elektromagnetycznych można zaliczyć:

- odporność na przepływy zwrotne, turbulenty i laminarne (sygnał pomiarowy zależy od średniej wartości prędkości),
- odporność na obecność wysokiej koncentracji ciał stałych (np. szlamy kopalniane, masy celulozowe, ścieki),
- brak dodatkowych oporów hydraulicznych w kanale przepływowym,
- niezależność pomiaru od ciśnienia, gęstości, temperatury i lepkości cieczy.

Powyższe zalety czynią elektromagnetyczny sposób pomiaru przepływu cieczy bezkonkurencyjnym w stosunku do innych, znanych metod pomiarowych. Z tej racji, metoda ta idealnie nadaje się do monitorowania przepływu wód w zbiornikach retencyjnych na terenach zalewowych. Niestety tereny te często położone są poza obszarami zurbanizowanymi, w dużej odległości od sieci energetycznych. Dlatego najwygodniejszym sposobem zasilania autonomicznych stacji pomiarowych w tych obszarach jest wykorzystanie odnawialnych źródeł energii elektrycznej takich jak panele słoneczne czy małe elektrownie wiatrowe, które mają ograniczoną wydajność energetyczną.

Mimo stosunkowo prostej zasady działania przepływomierza elektromagnetycznego, uzyskiwana na jego wyjściu informacja pomiarowa jest silnie zakłócona przez wolnozmienną szumy o podłożu elektrochemicznym i elektrokinetycznym, których nie można wyeliminować na drodze sprzętowej [1]. Oczywistym sposobem poprawy stosunku sygnał użyteczny/szum jest zwiększenie pola magnetycznego, ale to z kolei pociąga za sobą konieczność zwiększenia

energii do zasilania cewki wytwarzającej pole magnetyczne. Aktualnie stosowane algorytmy pomiarowe [2][3] wymagają ponadto utrzymywania zmiennego prądu w cewce w stanie ustalonym, co dla uzyskiwania zadowalających niepewności pomiarów wiąże się ze stosowaniem wzmacniaczy mocy, do których działania potrzebne są dodatkowe nakłady energii, wielokrotnie przewyższające pobór energii przez urządzenia sterujące.

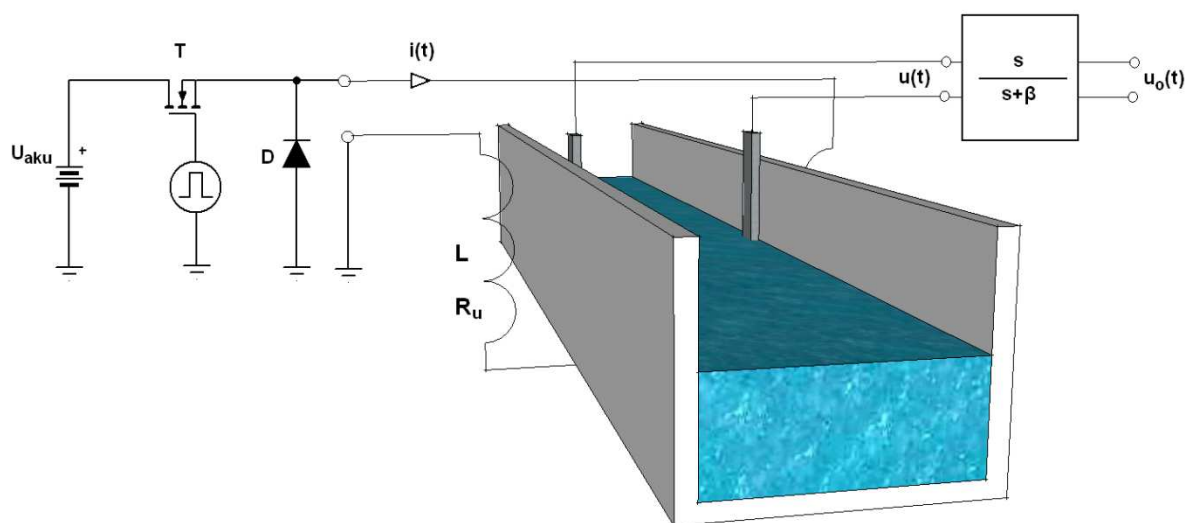
Ze względu na powyższe uwarunkowania, koniecznym stało się opracowanie algorytmu pomiarowego dla oszacowania przepływu cieczy przepływomierzem elektromagnetycznym w warunkach impulsowego dostarczania energii. Przyjęcie takiego sposobu pobudzenia przepływomierza umożliwi panowanie nad relacją uzyskiwanej niepewności do poziomu dostarczanej energii, ale wiąże się z koniecznością opracowania niestandardowych procedur przetwarzania sygnałów o ekstremalnie niskim stosunku sygnał / szum.

## 1. PODSTAWOWY UKŁAD POBUDZENIA IMPULSOWEGO Z JEDNYM KLUCZEM

Ze uwagi na jak najlepszą optymalizację pod względem energetycznym, obwód dostarczania energii powinien być jak najprostszy a liczba elementów pośredniczących między źródłem zasilania a cewką przetwornika pierwotnego – jak najmniejsza. Jednocześnie, użytkownik musi mieć możliwość regulowania ilości dostarczanej energii w zależności od wymaganego poziomu niepewności pomiaru. Układ, spełniający powyższe wymagania, został zaprezentowany i przeanalizowany w artykule [4].

### 1.1. Schemat układu

Schemat układu pokazany jest na rys. 2.



**Rys. 2.** Schemat układu pobudzenia impulsowego przetwornika elektromagnetycznego, z jednym kluczem.

Źródłem zasilania w powyższym układzie jest akumulator, bardzo często używany do magazynowania energii w instalacjach zasilanych z alternatywnych źródeł odnawialnych. Tranzystor  $T$ , pełniący rolę klucza, odpowiada za dołączenie cewki pobudzającej przetwornika elektromagnetycznego, o indukcyjności własnej  $L$  i rezystancji uzwojeń  $R_u$ , do akumulatora na krótki, regulowany okres czasu. W czasie załączenia klucza, prąd w cewce zaczyna eksponencjalnie narastać, powodując jednocześnie wzbudzenie pola magnetycznego w kanale przepływowym. W momencie wyłączenia klucza prąd cewki jest podtrzymywany przez diodę zwrótną  $D$ , powodując rozładowanie energii zgromadzonej w polu magnetycznym.

Napięcie na elektrodach pomiarowych, mierzone jest przy pomocy standardowego, wysoko-impedancyjnego wzmacniacza pomiarowego. Na wyjściu wzmacniacza dołączony jest dodatkowo filtr górno przepustowy o częstotliwości odcięcia 0,48Hz, którego zadaniem jest tłumienie wolnozmiennych zakłóceń pochodzenia elektrochemicznego i elektrokinetycznego.

## 1.2. Analiza sygnałów

Załączenie klucza T powoduje eksponencjalne narastanie prądu w cewce, którego przebieg czasowy wyrażony jest wzorem:

$$i_n(t) = \frac{U_{aku}}{R_u} \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

Szybkość narastania prądu zależy od parametru  $\alpha$ , wyrażonego wzorem:  $\alpha = R_u/L$ . W rezultacie, w kanale przepływowym powstaje pole magnetyczne, a w poruszającej się cieczy, zgodnie z prawem Faradaya, pole elektryczne. Napięcie indukujące się na elektrodach ma składową zależną od szybkości przepływu cieczy, proporcjonalną do wartości prądu w cewce o amplitudzie  $A$ , oraz będącą wynikiem efektu transformatorowego, proporcjonalną do pochodnej prądu w czasie, o amplitudzie  $B$ :

$$u_n(t) = A \cdot i(t) + B \cdot \frac{d i(t)}{dt} \quad (3)$$

Przebieg czasowy napięcia na elektrodach, można wyrazić wzorem:

$$u_n(t) = A + (\alpha B - A) \cdot e^{-\alpha t} = A + C \cdot e^{-\alpha t} \quad (4)$$

a, po przekształceniu Laplace:

$$U_n(s) = \frac{A}{s} + \frac{C}{s+\alpha} \quad (5)$$

Następnie, napięcie z elektrod trafia na wzmacniacz pomiarowy i filtr górnoprzepustowy. Transmitancja tego filtra jest znana i można ją wyrazić wzorem:

$$H(s) = \frac{s}{s+\beta} \quad (6)$$

gdzie  $\beta$ , jest parametrem filtra równym  $\frac{1}{C_f \cdot R_f}$

W celu wyznaczenia napięcia mierzonego przez system pomiarowy, należy pomnożyć wartość napięcia na elektrodach (w dziedzinie Laplace'a) przez transmitancję filtra:

$$U_{no}(s) = \frac{A}{s+\beta} + \frac{s \cdot C}{(s+\alpha)(s+\beta)} \quad (7)$$

Korzystając z metody rozkładu na ułamki proste, można wyznaczyć przebieg czasowy mierzonego napięcia:

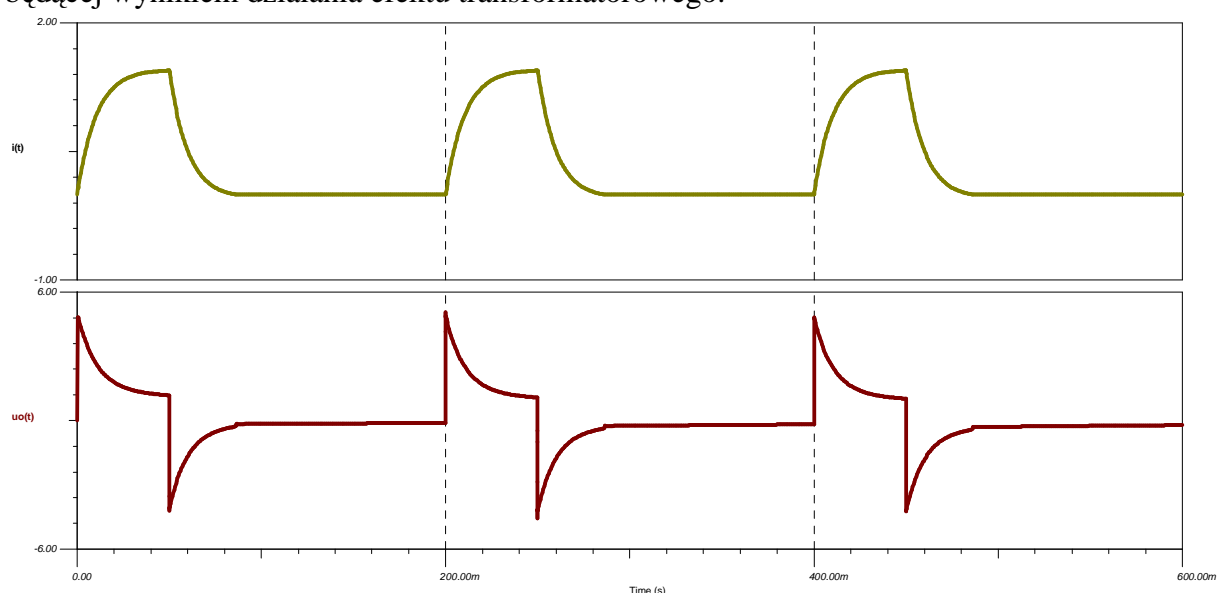
$$u_{no}(t) = \left( A + C \frac{\beta}{\beta-\alpha} \right) \cdot e^{-\beta t} + C \frac{\alpha}{\alpha-\beta} \cdot e^{-\alpha t} \quad (8)$$

Zatem, napięcie mierzone na elektrodach, w czasie trwania narastającego zbocza prądu w cewce, zawiera dwie składowe:

$$u_{no}(t) = w_1 \cdot e^{-\beta t} + w_2 \cdot e^{-\alpha t} \quad (9)$$

Amplitudy tych składowych niosą informację o szybkości przepływu cieczy oraz o wielkości efektu transformatorowego. Mierzone napięcie wyjściowe jest określone liniową zależnością parametrów  $w_1$  i  $w_2$ . Współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$ , są znane więc  $w_1$  i  $w_2$  mogą być oszacowane np. metodą najmniejszych kwadratów.

W niniejszym artykule analogiczną analizę sygnału przeprowadzono dla opadającego zbocza prądu. W tym przypadku przebieg prądu jest proporcjonalny do czynnika  $e^{-\alpha t}$ , co powoduje, że pochodna prądu ma ten sam kształt co sygnał podstawowy. W praktyce uniemożliwia to wykorzystanie tego zbocza do pomiaru przepływu, gdyż nie ma możliwości rozróżnienia składowej proporcjonalnej do prędkości poruszającej się cieczy od składowej będącej wynikiem działania efektu transformatorowego.



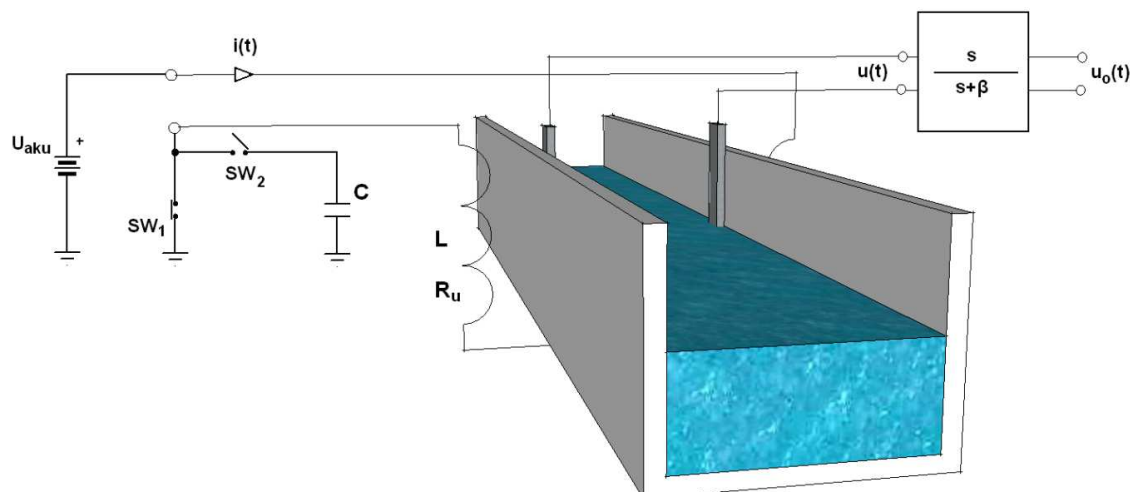
**Rys. 3** Przykładowy przebieg prądu w cewce oraz napięcia na wyjściu filtra pomiarowego w układzie z jednym kluczem.

## 2. ZMODYFIKOWANY UKŁAD POBUDZENIA IMPULSOWEGO Z DWOMA KLUCZAMI

Z uwagi na ograniczenia omawianego w rozdziale 1 układu, uniemożliwiające pomiar prędkości przepływu na opadającym zboczach prądu a tym samym w znacznym stopniu pogarszające efektywność energetyczną obwodu, postanowiono dokonać modyfikacji tego układu, tak by w czasie rozładowania energii zgromadzonej w cewce umożliwić pomiar prędkości cieczy. W tym celu, przy pomocy dodatkowego klucza, w czasie rozładowania energii dołączany jest do obwodu szeregowy kondensator taki, że prąd rozładowania cewki przyjmuje charakter oscylacyjny.

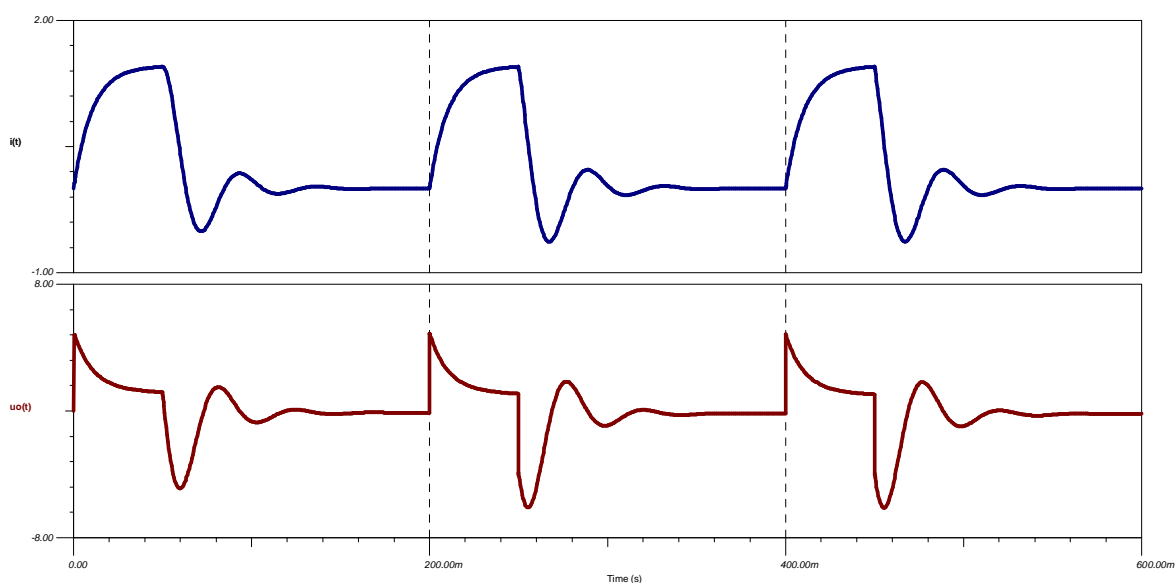
### 2.1. Schemat układu

Schemat zmodyfikowanego układu pokazany jest na rys. 4.



**Rys. 4** Schemat zmodyfikowanego układu pobudzenia impulsowego przetwornika elektromagnetycznego z dwoma kluczami.

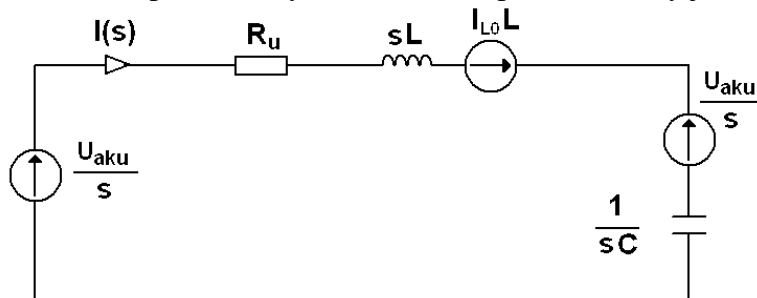
W chwili początkowej  $t_0$ , klucz  $SW_1$  jest zamknięty a  $SW_2$  otwarty. Powoduje to przyłączenie uzwojeń przetwornika pierwotnego do źródła zasilania i prąd w cewce zaczyna narastać identycznie jak opisano to w rozdziale 1. W momencie  $t_1$  następuje wyłączenie klucza  $SW_1$  i jednoczesne załączenie klucza  $SW_2$ . Skutkuje to dołączeniem do obwodu szeregowego kondensatora  $C$ . Jeżeli zostanie zapewniona relacja  $R_u < 2\sqrt{L/C}$ , to układ staje się oscylacyjnym obwodem RLC, w którym prąd rozładowania energii cewki nie ma charakteru eksponencjalnego  $e^{-\alpha t}$ . Do dalszych rozważań przyjęto wartość  $C$  równą 1.2mF, która przy zadanych parametrach obwodu cewki zachowuje powyższą relację. Przebiegi uzyskane na drodze symulacji (*Spice*) rzeczywistego przetwornika o parametrach  $L=35,3\text{mH}$  i  $R_u=3,43\Omega$  oraz filtra górnoprzepustowego przedstawia rys. 5 dla przypadku przyjęcia liczbowych wartości  $A=1$  oraz  $B=0,0353$ .



**Rys. 5** Przykładowy przebieg prądu w cewce oraz napięcia na wyjściu filtra pomiarowego w układzie z dwoma kluczami.

## 2.2. Analiza sygnałów

Analizę obwodu, w celu wyznaczenia przebiegu użytecznego napięcia wyjściowego, najlepiej przeprowadzić w dziedzinie operatorowej Laplace'a. Przed przystąpieniem do analizy należy wyznaczyć warunki początkowe układu w chwili czasowej  $t_1$ . W warunkach ustalonych, w momencie przełączania kluczy  $SW_1$  i  $SW_2$ , prąd w cewce ma ściśle ustaloną wartość  $I_{L0}$ , wynikającą z czasu załączenia klucza  $SW_1$ . Napięcie na kondensatorze  $C$  jest równe wartości napięcia akumulatora  $U_{aku}$ . Schemat obwodu w dziedzinie operatorowej, z uwzględnieniem warunków początkowych w chwili  $t_1$ , przedstawiony jest na rys. 6.



Rys. 6 Schemat układu w dziedzinie operatorowej w chwili  $t_1$ .

Dla powyższego obwodu, zgodnie z napięciowym prawem Kirchhoffa, można zapisać następujące równanie:

$$\frac{U_{aku}}{s} + I_{L0} \cdot L - \frac{U_{aku}}{s} - I_o(s) \cdot \left( R_u + sL + \frac{1}{sC} \right) = 0 \quad (10)$$

Stąd, prąd w obwodzie jest równy:

$$I_o(s) = \left( \frac{s \cdot I_{L0}}{s^2 + s \cdot \frac{R_u}{L} + \frac{1}{L \cdot C}} \right). \quad (11)$$

Wprowadzając oznaczenia  $\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left( \frac{R_u}{2 \cdot L} \right)^2}$  oraz  $\alpha = \frac{R_u}{2 \cdot L}$ , wzór na  $I_o(s)$  upraszcza się do postaci:

$$I_o(s) = \left( \frac{s \cdot I_{L0}}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} \right). \quad (12)$$

Na podstawie powyższego wzoru, można wyznaczyć postać czasową prądu rozładowania cewki (zbczce opadające):

$$i_o(t) = I_{L0} \cdot e^{-\alpha t} \left( \cos(\omega t) - \frac{\alpha}{\omega} \cdot \sin(\omega t) \right). \quad (13)$$

Przebieg czasowy napięcia na elektrodach wyraża zależność (3), której rozwinięcie z wykorzystaniem (13) umożliwia wyznaczenie przebiegu napięcia na elektrodach w postaci liniowej kombinacji tłumionych wykładniczo funkcji sinus i kosinus:

$$\begin{aligned} u_o(t) &= (A \cdot I_{L0} - B \cdot I_{L0} \cdot 2 \cdot \alpha) \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(\omega t) + \\ &+ \left( -A \cdot I_{L0} \frac{\alpha}{\omega} + B \cdot I_{L0} \cdot \frac{\alpha^2 - \omega^2}{\omega} \right) \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t) = \\ &= s_1 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(\omega t) + s_2 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (14)$$

Podobnie jak w przypadku zależności (9), współczynniki tej kombinacji –  $s_1$  i  $s_2$  zawierają informację o poszukiwanych parametrach  $A$  i  $B$ . Dostępnym pomiarowo przebiegiem jest jednak sygnał odpowiedzi filtru górnoprzepustowego pobudzonego powyższym napięciem. Z uwagi na fakt, że częstotliwość graniczna filtru równa 0.48Hz jest znacząco mniejsza od częstotliwości drgań rezonansowych, których wartość wynosi ok. 23Hz, istotne jest pytanie o sens uwzględniania wpływu filtru na wynikowe napięcie, na którym przeprowadzane są końcowe obliczenia. Transformatę Laplace'a odpowiedzi filtru można uzyskać na drodze przemnożenia jego transmitancji przez transformatę każdej ze składowych z zależności (14):

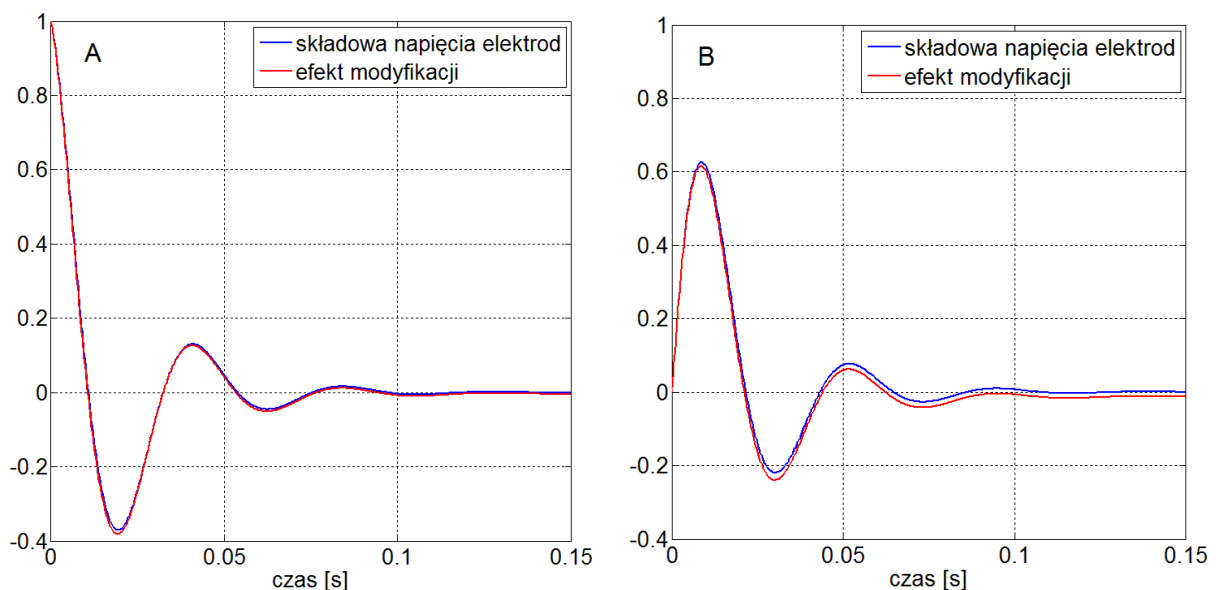
$$U_{oo} = s_1 \cdot \frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2} \cdot \frac{s}{s+\beta} + s_2 \cdot \frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2} \cdot \frac{s}{s+\beta}. \quad (15)$$

Po wstawieniu rzeczywistych wartości parametrów  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\omega$  oraz rozkładzie na ułamki proste powyższych iloczynów, w transformacie  $U_{oo}$  wystąpią składowe, które wraz z odpowiadającymi im przebiegami czasowymi tworzą następujące pary transformat:

$$\left[ \frac{a+jb}{s-(c+jd)} + \frac{a-jb}{s-(c-jd)} \right] \Leftrightarrow e^{ct} [2a \cdot \cos(dt) - 2b \cdot \sin(dt)], \quad (16)$$

$$\left[ \frac{f}{s+g} \right] \Leftrightarrow f \cdot e^{-gt}. \quad (17)$$

Porównanie przebiegów składowych sygnału zmodyfikowanych przez filtr z przebiegami składowych napięcia elektrod (przed modyfikacją) przedstawia rys. 7.



**Rys. 7** Porównanie składowych sygnału użytecznego przed i po filtracji filtrem górnoprzepustowym: A – tłumiony sinus, B – tłumiony kosinus.

Wizualna ocena składowych pozwala stwierdzić, że modyfikacje wnoszone przez filtr nie są znaczące. Jednakże o możliwości pominięcia wpływu filtru w obliczeniach decydować będzie poprawność oszacowania parametrów rzeczywistego lub symulowanego przepływu. Wyniki dla rozpatrywanej w artykule symulacji przedstawione zostały w Tabeli 1. Zawiera ona oszacowania parametrów przepływu uzyskane na drodze zastosowania metody najmniejszych kwadratów (LS) do wyznaczenia współczynników  $s_1$  i  $s_2$  na podstawie



dekompozycji sygnału z rys. 5, kolejno – z wykorzystaniem składowych powstających na elektrodach i z wykorzystaniem składowych na wyjściu filtru. W każdym z tych przypadków obliczenia parametrów  $A$  i  $B$  na podstawie  $s_1$  i  $s_2$  zrealizowane zostały na podstawie (14).

**Tab. 2.** Wyniki wyznaczania parametrów metodą najmniejszych kwadratów.

	parametr A	parametr B
wartość rzeczywista	1	0.0353
oszacowanie LS na podst. składowych odpowiedzi filtru	1.015	0.0356
oszacowanie LS na podst. składowych wymuszenia filtru	0.907	0.0356

Z przeprowadzonego porównania wynika, że obecność filtru powinna zostać uwzględniona. W przeciwnym przypadku wyniki szacowania LS obarczone są błędami. W rozpatrywanym przypadku błąd ten wyniósł ok. 10%.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony materiał wskazuje na istnienie możliwości szacowania parametrów przepływu również na zboczu opadającym prądu cewki przepływomierza elektromagnetycznego pobudzanego impulsowo, tzn. w trakcie oddawania przez nią zgromadzonej energii. Podstawowym warunkiem jest usunięcie zależności eksponencjalnej opisującej zmianę prądu w czasie i zastąpienie ją inną. W przypadku analizowanego wymuszonego przebiegu oscylacyjnego prądu za pomocą dodatkowego załączanego kondensatora można w przebiegu napięcia wyjściowego wskazać składowe, które umożliwiają skuteczne wykorzystanie metody najmniejszych kwadratów.

## BIBLIOGRAFIA

1. Michalski A., *Wybrane problemy syntezy przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych*, Zeszyty naukowe Politechniki Warszawskiej - Elektrotechnika, zeszyt 108 (1999), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
2. Polo J., Pallas-Areny R., Martin-Vide J.P., *Analog signal processing in an AC electromagnetic flowmeter*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 51, No 4 (2002), 793-797.
3. Jakubowski J., Michalski A., *An Energy-Saving Algorithm For Electromagnetic Flow Measurement in Open Channels*, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, vol. 14, nr 6 (2011), 40-45.
4. Michalski, A., Jakubowski, J., Watral, Z., *The problems of pulse excitation in electromagnetic flowmeters*, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, vol. 16, nr 5 (2013), 47-52.

# SOME ASPECTS OF MEASUREMENT UNCERTAINTY ANALYSIS FOR PULSE ELECTROMAGNETIC FLOWMETER

## *Abstract*

*The paper presents the possibilities to use the least squares method for flow velocity measurement by pulse-excited electromagnetic flowmeter.*

*The pulse excitation is to reduce the energy consumption of the flowmeter without decreasing of the measurement uncertainty.*

## *Autorzy:*

mgr inż. **Bogumił Brykalski** – Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: bogus@inbox.com

dr inż. **Jacek Jakubowski** – Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jjakubowski@wat.edu.pl

prof. dr hab. inż. **Andrzej Michalski** – Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych, ul. Plac Politechniki 1, 00-601 Warszawa, e-mail: anmi@iem.pw.edu.pl;