



## Problemy syntezy pól elektromagnetycznych na potrzeby budowy przetwornika pierwotnego przepływowomierza elektromagnetycznego do kanału otwartego

ANDRZEJ MICHALSKI<sup>1,2</sup>, JAN SIENKIEWICZ<sup>1</sup>,  
ZBIGNIEW WATRAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

<sup>2</sup>Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów  
Informacyjno-Pomiarowych, 00-661 Warszawa, ul. Koszykowa 35

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono typowe konstrukcje przetworników pierwotnych wraz z syntetyczną analizą podstawowych problemów konstrukcyjnych i jakościowych. Wynikiem przedstawionej analizy jest propozycja zmodyfikowanej procedury projektowania kształtu cewki wzbudzającej zapewniającej minimalizację kosztów budowy przy jednoczesnej poprawie jej głównych parametrów. Proponowane rozwiązanie opiera się na znanym warunku stałości wektora wagi w strefie pomiarowej, ale jego realizacja będzie odmienna od wcześniejszych, znanych konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, pomiary przepływu, przetworniki pomiarowe, przepływowomierz elektromagnetyczny

**Symbolne UKD:** 537.8

### Wstęp

Współczesne konstrukcje przetworników pierwotnych przepływowomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych cechuje z reguły stosunkowo złożona struktura uzwojeń, co w efekcie znacznie podraża koszt budowy, szczególnie dla kanałów przepływowych o szerokości powyżej 2 m. Proponowane współcześnie rozwiązania opierają się na znanym warunku stałości wektora wagi w strefie pomiarowej. Wektor wagi  $\mathbf{W}$  jest pojęciem znacznie szerszym od używanego przez Shercliffa [1] pojęcia funkcji wagi „ $w$ ” bądź prądu wirtualnego  $\mathbf{J}$ . Rozkład wektora wagi niesie dodatkową

informację o rozkładzie wektora indukcji wzbudzanego pola magnetycznego. Sygnał użyteczny przepływomierza jest funkcją rozkładu prędkości mierzonego medium oraz rozkładu wektora wagi. Z metrologicznego punktu widzenia podstawowym problemem staje się określenie warunków, jakie powinien spełniać wektor wagi  $\vec{W}$ , żeby przepływomierz mógłby być traktowany jako „idealny”. Przepływomierz „idealny” to taki dla którego sygnał pomiarowy nie zależy od przestrzennego rozkładu wektora prędkości przy stałej jego wartości średniej.

Gdy mierzona ciecz jest nieściśliwa ( $\text{div } \vec{v} = 0$ ) i pole magnetyczne bądź układ elektrod są ograniczone, to warunkiem koniecznym i dostatecznym dla przepływomierza idealnego jest spełnienie przez wektor wagi  $\vec{W}$  warunku:

$$\text{rot}(\vec{B} \times \vec{J}) = \text{rot}(\vec{W}) = 0. \quad (1)$$

Dowód warunku (1) w formie dostatecznej i koniecznej można znaleźć w pracy [2].

Określenie rozkładu wirtualnego wektora gęstości prądu  $\vec{J}$ , a w dalszej kolejności rozkładu wektora wagi  $\vec{W}$ , jest jednym z najistotniejszych zagadnień występujących w projektowaniu przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego. Rozkład wektora gęstości prądu wirtualnego  $\vec{J}$  może być opisany zależnością (2)

$$\vec{J} = -\gamma \text{grad} \varphi, \quad (2)$$

gdzie:  $\varphi$  jest rozwiązaniem równania Laplace'a przy założeniu specyficznych warunków brzegowych i oznacza potencjał hipotetycznego pola elektrycznego, a  $\gamma$  jest konduktywnością.

Zgodnie z metodą zaproponowaną przez Bevira [2], rozkład wektora gęstości prądu wirtualnego w strefie pomiarowej odpowiada rozkładowi hipotetycznego prądu o jednostkowym natężeniu w obszarze między elektrodami. Ze względu na prostszą metodykę numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych, rozkład  $\vec{J}$  jest wyznaczany zazwyczaj przy wymuszeniu napięciowym. Rozkład potencjału hipotetycznego pola elektrycznego jest wyznaczany z rozwiązania równania Laplace'a ( $\text{div}(\gamma \text{ grad } \varphi) = 0$ ) ze specyficznymi warunkami brzegowymi Dirichleta ( $\varphi_{e1} = 1, \varphi_{e2} = 0, \varphi_e$  — potencjał elektrody) [3]. Jeżeli problem jest liniowy, to w przyjętej metodzie obliczeń, rozkład wektora  $\vec{J}$  może być opisany równaniem (3)

$$\vec{J} = -\alpha \gamma \text{grad} \varphi. \quad (3)$$

Wartość współczynnika  $\alpha$ , wyznaczana z zależności (4), zależy od kształtu kanału przepływowego, konduktywności jego ścian i dna oraz kształtu i wielkości elektrod pomiarowych

$$\alpha = 1 / \left| \int_{S_e} \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds \right|, \quad (4)$$

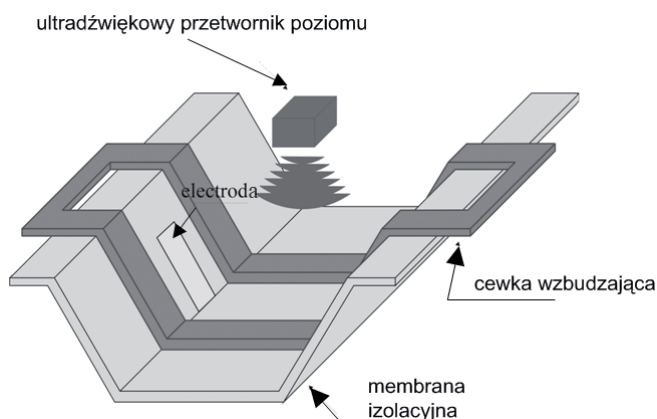
gdzie:  $\gamma$  jest konduktywnością cieczy,  $S_e$  — powierzchnia elektrody,  $\int_{S_e} \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds$  — rzeczywista wartość prądu elektrody.

W przypadku przepływomierza „idealnego” sygnał pomiarowy nie zależy ani od poziomu cieczy w kanale, ani od stosunku konduktywności ciecz/grunt, ani też od rozkładu wektora prędkości cieczy.

Modelowy przepływomierz „idealny” cechuje się: kanałem przepływowym o prostokątnym przekroju poprzecznym strefy pomiarowej i izolowanych brzegach, jednorodnym polem magnetycznym i dwiema długimi (doskonale przewodzącymi) elektrodami umieszczonymi na przeciwległych ścianach kanału. Taki układ elektrod i kanału daje jednorodny rozkład wektora gęstości prądu wirtualnego. Jeżeli rozkład indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  jest również jednorodny, to jednorodny jest też rozkład wektora wagi  $\vec{W}$ . Wtedy sygnał pomiarowy (różnica potencjałów elektrod) jest niezależny od rozkładu wektora prędkości.

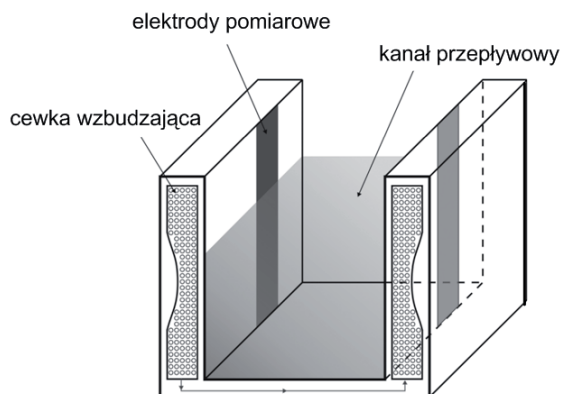
Modelowy przetwornik pierwotny przepływomierza elektromagnetycznego stosowanego w kanałach otwartych składa się z fragmentu kanału przepływowego otoczonego cewką wzbudzającą pole magnetyczne i pary długich elektrod pomiarowych.

Na przestrzeni wielu lat badań nad konstrukcją przetworników pierwotnych analizowano wiele rozwiązań, nie zawsze uzyskując zadowalające rezultaty. Jedną z pierwszych konstrukcji była klasyczna cewka położona bezpośrednio na brzegu trapezoidalnego kanału (rys. 1).



Rys. 1. Klasyczny układ przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego dla kanału otwartego

Uzyskany rozkład wektora wagi daleki był od jednorodności. Wynikające z tego błędy pomiarowe były kompensowane za pomocą macierzy współczynników korekcyjnych [4]. W okresie ostatnich 10 lat mocno rozwijana jest konstrukcja przetwornika zapewniająca znaczącą poprawę jednorodności wektora wagi w strefie przepływowej (rys. 2).



Rys. 2. Współczesna konstrukcja przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego dla kanału otwartego

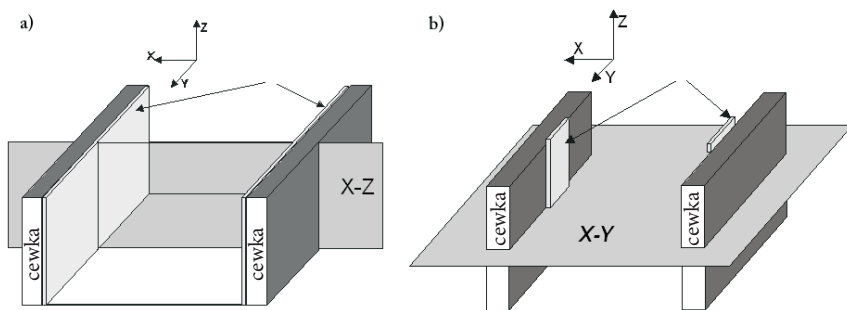
Przedstawiona konstrukcja wykorzystywana była zarówno do kanałów o przekroju prostokątnym, jak i do kanałów o przekroju trapezoidalnym. Nierównomierność rozkładu wektora wagi, a tym samym składowa niepewności pomiaru będąca tego efektem, jest znacznie korzystniejsza dla przekroju prostokątnego niż dla trapezoidalnego, niemniej w obu przypadkach jest zadawalająca z punktu widzenia potrzeb hydrologicznych. Konstrukcja przedstawiona na rysunku 2 będzie przedmiotem dalszych analiz mających na celu optymalizację rozkładu wektora wagi.

## Modele matematyczne wykorzystywane w procedurach optymalizacyjnych

Naturalną przestrzenią dla prowadzenia analiz pól magnetycznych i elektrycznych w przepływomierzu elektromagnetycznym jest przestrzeń trójwymiarowa. Wiele obecnych i wcześniejszych publikacji [4] dotyczy jednak stosowania (przy przyjęciu dodatkowych założeń) modeli dwuwymiarowych (2D) do opisu zjawisk przestrzennych. Powód takich poszukiwań jest prosty: analiza przypadku 2D jest prostsza, tańsza i może być przeprowadzona z wykorzystaniem typowych komputerów klasy PC.

## Model dwuwymiarowy

Metodyka wykorzystania dwuwymiarowego modelu matematycznego w syntezie przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego koncentruje się na dwóch zasadniczych zagadnieniach. Pierwszym zagadnieniem jest określenie kształtu przekroju poprzecznego cewki wzbudzającej pole magnetyczne, zaś drugim określenie długości cewki (w kierunku przepływu). Oba te zagadnienia wymagają odrębnych modeli matematycznych (rys. 3).



Rys. 3. Modele przepływomierza stosowane przy określeniu przekroju poprzecznego cewki (a) i określeniu jej długości (b)

Przyczyna takiego rozdzielenia problemów leży w różnej istocie zjawisk, na których opiera się procedura projektowa. Synteza prowadzona z wykorzystaniem każdego z tych modeli z osobna uwzględnia takie założenia, które nie są akceptowane przez oba modele wspólnie.

Określenie kształtu przekroju poprzecznego cewki prowadzone jest na płaszczyźnie X-Z (rys. 3a). Przyjęcie takiej płaszczyzny analiz wymaga założenia nieskończonej długości przepływomierza wzdłuż osi Y (w kierunku przepływu). Pod pojęciem nieskończonej długości przepływomierza rozumiana jest niezmiennosc zarówno kanału przepływowego, cewki wzbudzającej, jak i elektrod wzdłuż osi Y. W rezultacie takie założenie sprowadza się do przyjęcia niezmienności wzdłuż osi Y wszelkich wyznaczanych rozkładów w płaszczyźnie X-Z. Takie założenie dotyczy przede wszystkim rozkładu wirtualnego wektora gęstości prądu, wektora indukcji pola magnetycznego oraz rozkładu potencjału pola elektrycznego wzbudzanego w strefie pomiarowej.

Określenie optymalnej długości cewki wzbudzającej odbywa się z wykorzystaniem analiz prowadzonych w płaszczyźnie X-Y (rys. 3b). Przyjęcie takiej płaszczyzny analiz sprowadza się do założenia niezmienności wszystkich wymiarów przetwornika pierwotnego wzdłuż osi Z. W efekcie tak postawionego problemu zakłada się nieskończone wymiary dotyczące głębokości kanału przepływowego i wysokości cewki wzbudzającej oraz długości elektrod pomiarowych. Za pomocą

analiz prowadzonych w płaszczyźnie X-Y można uwzględnić rzeczywistą długość cewki wzbudzającej, szerokość elektrod pomiarowych oraz szerokość kanału przepływowego. Wszystkie te wielkości są niezbędne do oceny wpływu skończonej długości cewki przepływomierza na wartość sygnału pomiarowego, a tym samym pozwalają określić optymalną długość (w kierunku przepływu) przetwornika pierwotnego.

Jak wykazano w pracy [5], różnica napięć między elektrodami pomiarowymi jest niezależna od rozkładu wektora prędkości, jeśli w całej strefie pomiarowej przepływomierza spełniona jest zależność  $\text{rot}(\bar{W})=0$ . Zgodnie z przyjętym założeniem o prostoliniowym przepływie ( $\vartheta = [0, \vartheta_y(x, z), 0]$ ) wektor  $\bar{W}$  można zastąpić wielkością skalarną  $W$ , co prowadzi do uproszczenia zależności (1) do postaci

$$U_e = \varphi_{e_1} - \varphi_{e_2} = \int_S \vartheta_y W(x, z) ds, \quad (5)$$

gdzie  $S$  jest powierzchnią przekroju poprzecznego kanału przepływowego mierzoną w strefie pomiarowej. W równaniu (5)  $W(x, z)$  jest funkcją wagi opisaną zależnością

$$W(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_y dy, \quad (6)$$

gdzie  $W_y(x, y, z) = B_z J_x - B_x J_z$ .

Tak więc ogólny warunek (1) definiujący przepływomierz „idealny” przyjmuje znacznie prostszą postać  $W(x, z) = \text{const}$ . Jeżeli przeniesiemy ten warunek na zaproponowany model dwuwymiarowy, to obszarem naszych analiz będzie płaszczyzna X-Z ze wszystkimi związanymi z tym konsekwencjami. Wspomniana powyżej zależność stanowi podstawę do wyznaczania kształtu przekroju poprzecznego cewki wzbudzającej w procedurze projektowania przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego.

## Model trójwymiarowy

Model trójwymiarowy przetwornika pierwotnego przepływomierza elektromagnetycznego dla kanałów otwartych został opracowany pod koniec lat dziewięćdziesiątych przez zespół pracowników Politechniki Warszawskiej [6]. Wykorzystany jest nie tylko do analizy, ale także, w mniejszym stopniu, do optymalizacji konstrukcji przetwornika pierwotnego. Specyfika równania opisującego rozkład

potencjału elektrycznego w korycie i cieczy kanału przepływowego, w którym występują trzy pola (prędkości cieczy, magnetyczne i elektryczne) ograniczyła możliwość wykorzystania gotowych pakietów symulacji pól. Do opisu pola elektrycznego wykorzystuje się metodę elementów skończonych (MES), w której sieć elementów skończonych (ES) jest generowana przy pomocy generatora Netgen na podstawie opisu CSG (Constructive Solid Geometry). Do napisania symulatora wykorzystano bibliotekę obiektową (C++) Diffpack. Pole prędkości cieczy w kanale jest zadawane jako funkcja analityczna. Pole magnetyczne jest obliczane metodą półanalityczną (numeryczne całkowanie wzorów wynikających z prawa Ampera). Ponadto język VRML wykorzystuje się do prezentacji wyników obliczeń. Takie podejście umożliwia łatwe przekształcenie wyników obliczeń w barwne, trójwymiarowe modele przetwornika, bardzo wartościowe do szybkiej oceny jakości projektu cewki. Modele te mogą być wykorzystane jako fragment dokumentacji obliczeń w formie np. stron WWW.

Pakiet realizujący przedstawione powyżej założenia składa się z 3 dużych i kilku mniejszych programów napisanych w C++. Całe środowisko obliczeniowe zaimplementowane w systemie operacyjnym Linux zapewnia stabilność wymaganą przy potencjalnie dość czasochłonnych obliczeniach.

Proces modelowania przepływomierza realizowany jest w formie następującego schematu: określenie wymiarów kanału, elektrod pomiarowych, utworzenie opisu CSG i generacja sieci elementów skończonych, określenie pola prędkości cieczy, określenie geometrii cewki wymuszającej, symulacja pola elektrycznego określonego równaniem Poissona i wyznaczenie sygnału przetwornika, ewentualne utworzenie modeli z wykorzystaniem języka VRML. Przedstawiony schemat wymaga określenia wielu parametrów opisujących model. Do tego celu wykorzystuje się graficzny interfejs użytkownika, który ułatwia wprowadzanie danych i umożliwia



Rys. 4. Przykładowa geometria trójwymiarowego modelu przetwornika



zarządzanie wynikami eksperymentów numerycznych. Tzw. wirtualny przepływomierz budowany jest w środowisku graficznym X-Window z wykorzystaniem języka Tcl/Tk [7]. Przykładowa geometria trójwymiarowego modelu przetwornika przedstawiona jest na rysunku 4.

Model numeryczny przetwornika składa się z dwóch siatek zbudowanych w oparciu o metodę elementów skończonych i czterech pól (pole elektryczne, pole magnetyczne, pole prędkości i pole elektryczne) związanych z tymi siatkami. Symulacja pola elektrycznego rozpoczyna się od wyznaczenia pól prędkości i indukcji magnetycznej na sześciociennej siatce wewnątrz kanału. Ta siatka służy też do wyznaczenia pola będącego źródłem pola elektrycznego. Siatka wewnątrz kanału składa się z elementów ośmiowęzłowych, a jej gęstość określana jest przez użytkownika. W następnym kroku jest formowany numeryczny model pola elektrycznego na prostopadłościennym siatce zbudowanej z czworościanów. Siatka ta obejmuje kanał i obszar otoczenia. Elektroda jest modelowana w postaci materiału anizotropowego o dużej przewodności w kierunkach  $y$  i  $z$  (wzdłuż kanału i kierunku góra-dół) i bardzo małej przewodności w kierunku  $x$  poprzecznym do kanału (odzworowuje to odizolowanie elektrody od brzegu kanału). Na osi symetrii kanału i na brzegach zewnętrznych są zadawane zerowe warunki Dirichleta. Po utworzeniu i rozwiązaniu układu równań otrzymuje się sygnał pomiarowy jako podwojoną wartość potencjału na elektrodzie. Program wyznacza też średnią wartość prędkości cieczy.

Szybkość działania analizatora i wygodny interfejs użytkownika umożliwiają interakcyjne projektowanie cewki z uwzględnieniem całej złożoności trójwymiarowego modelu. Wykorzystanie hybrydowego modelu pola istotnie zwiększa efektywność symulatora.

## Kierunki dalszych prac

Przedstawiony opis dwóch modeli matematycznych przepływomierza elektromagnetycznego do kanałów otwartych wykorzystywanych w syntezie przetwornika pierwotnego daje możliwość oceny zalet każdego z dwóch niezależnych podejść do analizowanego problemu. Model 2D przepływomierza zakładający istotne uproszczenia, pozwala na przeprowadzenie skutecznej syntezy cewki wzbudzającej, mimo że procedura opiera się na analizie dwóch rozłącznych modeli opisujących występujące zjawiska w dwóch płaszczyznach przy przyjęciu wzajemnie się wykluczających założeń. Opisany model 3D przepływomierza jest pozbawiony tak daleko idących uproszczeń, jakie występowały w przypadku modelu 2D, jednakże wymagania stawiane sprzętowi obliczeniowemu zdecydowanie przewyższają wymagania stawiane przy analizie modelu 2D. Wyniki uzyskiwane z przeprowadzonych badań nad modelem 3D wykazują dużą zbieżność z wynikami otrzymanymi



z modelu 2D. Głównie dotyczy to procedur określania wpływu zakłócających pól elektrycznych indukowanych w strefach ostrego zaniku pola magnetycznego na sygnał użyteczny, na podstawie których wyznaczana jest minimalna długość cewki wzbudzającej. Kilkuletnie doświadczenia autorów poparte wynikami wielu badań symulacyjnych sugerują, że efektywna synteza kształtu przekroju poprzecznego cewki wzbudzającej może być prowadzona z wykorzystaniem modelu 2D. Jednakże wstępna charakterystyka przetwarzania przepływomierza powinna być wyznaczana już w modelu 3D, do którego wprowadzi się cewkę wzbudzającą o kształcie uzyskanym w modelu 2D. Takie połączenie dwóch różnych modeli daje możliwość korzystania z szybkości procedur optymalizacyjnych w modelu 2D i dokładności analiz pola elektrycznego prowadzonych w modelu 3D.

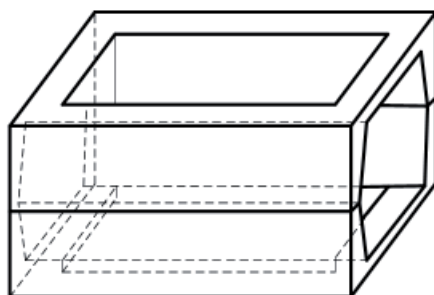
Docelowo kierunek dalszych prac to przygotowanie pakietu programowego przeznaczonego do trójwymiarowego projektowania przetwornika pierwotnego. Opracowywane oprogramowanie będzie umożliwiało zaprojektowanie zoptymalizowanej geometrii cewki generującej pole magnetyczne dostosowanej do wymiarów kanału (max. 3 m × 3 m), przewidywanych przepływów (poziomu i profilu prędkości), parametrów materiałowych brzegów i dna kanału, geometrii elektrod pomiarowych, parametrów układu zasilającego.

Jednym z głównych problemów jest wybór zmiennych optymalizacyjnych do projektowania kształtu cewki wzbudzającej. Jedno z możliwych rozwiązań to dyskretyzacja cewki wzbudzającej na szereg elementów prostopadłościennych o zadanych wymiarach geometrycznych, w których definiuje się zwrot i wartość wektora natężenia prądu wzbudzającego. Wymiary geometryczne bloku opisane są wtedy przez punkt zdefiniowany w przestrzeni modelu oraz dwa wzajemnie prostopadłe wektory wyznaczające przekrój. Iloczyn wektorowy tych wielkości określi kierunek przepływu prądu przez dany blok. Tak zdefiniowana cewka wzbudzająca składa się z dowolnej liczby bloków. Istotnym problemem jest zachowanie warunku  $\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{s} = \text{const}$ , gdzie  $\Delta \mathbf{s}$  jest przekrojem poprzecznym prostopadłościanu. Wymiary tych bloków, a także ich liczba będą zmiennymi optymalizacyjnymi.

Kolejnym ważnym zagadnieniem będzie wybór funkcji celu wykorzystywanej w procedurze optymalizacyjnej kształtu cewki wzbudzającej. Pod uwagę będą brane trzy kryteria: pierwsze, klasyczne zakładające stałość wektora wagi w strefie pomiarowej, drugie zakładające pożądaną przebieg charakterystyki przetwarzania i trzecie minimalizujące objętość cewki, co jest równoznaczne z minimalizacją kosztów jej wytworzenia. Na tym etapie prac przewiduje się wykorzystanie wielokryterialnego algorytmu ewolucyjnego zaimplementowanego w formie pakietu ECJ Javy.

Obecnie autorzy prowadzą wstępne prace dotyczące zaprojektowania przepływomierza do pomiaru przepływu głównie w oczyszczalniach ścieków i małych kanałach irygacyjnych. W rozwiązaniu tym przewiduje się zmianę koncepcji cewki wzbudzającej w stosunku do dotychczas stosowanych rozwiązań. W tego typu aplikacjach przekrój poprzeczny kanału przepływowego jest prostokątny i kanały te nie

są przewidziane do jakiegokolwiek formy żeglugi. Takie założenie daje możliwość nieco innego ukształtowania cewki wzbudzającej, które poprawi równomierność wzbudzanego pola magnetycznego. Zarys konstrukcji opracowywanej cewki wzbudzającej pole magnetyczne przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 5. Koncepcja cewki wzbudzającej nowej generacji

Cewka ta jest rozwinięciem koncepcji cewek Helmholtza zapewniających optymalną równomierność rozkładu pola magnetycznego w strefie pomiarowej dla kanałów o prostokątnym przekroju poprzecznym niezależnie od stopnia napełnienia kanału przepływowego. Dalsze analizy i procedura optymalizacyjna będą prowadzone dla tego typu konstrukcji.

Docelowy pakiet oprogramowania wykorzystywany w procedurze projektowej składa się z: generatora trójwymiarowych modeli numerycznych, jądra symulacyjnego do wyznaczania rozkładów pola elektromagnetycznego, optymalizacji wymiarów, wyznaczania charakterystyk przetwarzania przetwornika oraz graficznego interfejsu użytkownika. Cały pakiet tworzony jest z wykorzystaniem powszechnie dostępnych (na licencji *open source*) bibliotek pomocniczych i może być udostępniany na zasadach oprogramowania otwartego. Pakiet programowy łatwy w instalacji z przyjaznym interfejsem graficznym użytkownika może być przenoszony na inne komputery. Opracowywana postać pakietu zakłada możliwość obsługi przez osoby niebędące ekspertami w analizie i syntezie pól elektromagnetycznych, co pozwoli na stosunkowo dużą powszechność zastosowań.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

#### LITERATURA

- [1] I. A. SHERCLIFF, *The theory of electromagnetic flow measurement*, Cambridge University Press, 1962.
- [2] M. K. BEVIR, *The Theory of Electromagnetic flowmeter*, Journ. Fluid Mech., 43, 1970.

- [3] A. MICHALSKI, J. STARZYŃSKI, ST. WINCENCIAK, *Electromagnetic Flowmeters For Open Channels — Two Dimensional Approach To Design Procedures*, IEEE Sensors Journal, vol. 1, no 1 June 2001, 52-62.
- [4] R. W. HERSHEY, *Hydrometry*, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [5] A. MICHALSKI, *Wybrane problemy syntezy przetworników pierwotnych przepływomierzy elektromagnetycznych dla kanałów otwartych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [6] A. MICHALSKI, J. STARZYŃSKI, ST. WINCENCIAK, *3D approach to design the excitation coil of an electromagnetic flow meter*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no 4, August 2002, 833-839.

A. MICHALSKI, J. SIENKIEWICZ, Z. WATRAL

**Problems of electromagnetic fields synthesis in a case of primary transducer for electromagnetic flow meter for open channel constructions**

**Abstract.** Typical constructions of a primary transducer for flow meters dedicated to open channels, associated with a simplified analysis of metrological quality are presented. As a result of this analysis, the authors propose a modified design procedure of an excited coil, which provides the cost minimization and quality improvement. The proposed solution is based on very well known condition, homogeneous distribution of weight vector in a measurement zone, but the realization is different from previously known procedures.

**Keywords:** electromagnetic field, flow measurements, measurement transducer, electromagnetic flow meter

**Universal Decimal Classification:** 537.8

