

**Witold MICKIEWICZ, Michał Jakub JABŁOŃSKI**  
ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE,  
Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

## Obrazowanie wartości skutecznej prędkości akustycznej na bazie pomiarów PIV

Dr inż. Witold MICKIEWICZ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej (mgr inż. 1994, dr inż. 1999) oraz Wydziału Instrumentalnego Akademii Muzycznej w Poznaniu (mgr sztuki 2000). Adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki WE ZUT. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół inżynierii dźwięku. Obecnie związany z natężeniową i laserową techniką obrazowania pól akustycznych.



e-mail: [witold.mickiewicz@zut.edu.pl](mailto:witold.mickiewicz@zut.edu.pl)

Mgr inż. Michał Jakub JABŁOŃSKI

W 2011 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. Aktualnie uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym, w Katedrze Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki. Zainteresowania badawcze: akustyka wektorowa, przetwarzanie sygnałów, układy FPGA.



e-mail: [michal.jablonski@zut.edu.pl](mailto:michal.jablonski@zut.edu.pl)

### Streszczenie

Laserowa anemometria obrazowa (PIV) służy obrazowaniu pól prędkości i jest stosowana do przepływów masowych, a w ostatnich latach również do pól akustycznych, w których chwilowa prędkość akustyczna w danym punkcie pola jest wielkością wektorową zmienną w czasie. W artykule zaproponowano sposób wizualizacji pola prędkości akustycznej w formie rozkładu odcinków, których długość odpowiada wartości skutecznej prędkości a nachylenie jest związane z kierunkiem przepływu energii akustycznej.

**Słowa kluczowe:** prędkość akustyczna, obrazowanie, PIV.

### Imaging of the effective value of acoustic velocity based on PIV measurements

#### Abstract

Laser Particle Image Velocimetry is a modern method for visualisation of a velocity field, commonly used in fluid mechanics in order to describe the distribution of mass flows. Recently, this method has been applied to acoustic field visualisation, where the instantaneous particle velocity varies in terms of direction and vector orientation. The paper discusses utility of that approach in comparison to the full sound intensity description. A widely applied parameter describing the energy flow in an acoustic field is the intensity vector (formula (1)). In order to evaluate this parameter, there are needed measurements of the acoustic velocity and pressure to be taken. The evaluation of the parameter needs two basic measurements: acoustic velocity and pressure. In case of the lack of the direct pressure or velocity data, the output is a scalar value. The paper describes the distribution of velocity vectors in several subsequent phases (Fig. 1) and presents a mathematical formula (formula (11)) which provides possibility to obtain the main direction of the acoustic energy propagation. The data obtained from the laser system (Figs. 2 and 3) is compared with the hot-wire anemometry (Fig. 4 left) and the sound intensity distribution (Fig. 4 right).

**Keywords:** acoustic velocity, visualisation, PIV.

## 1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowanymi parametrami używanymi do opisu właściwości akustycznych urządzeń i systemów są różnego rodzaju pochodne wielkości skalarnej, jaką jest ciśnienie akustyczne. Taki stan rzeczy spowodowany jest powszechnością i małym skomplikowaniem aparatury do pomiarów ciśnienia akustycznego – jedynym wymaganym czujnikiem pomiarowym jest mikrofon pojemnościowy. Jednak wnioskowanie na podstawie ciśnienia obarczone jest z reguły przyjęciem wielu założeń upraszczających dotyczących m.in. przestrzennego rozkładu fali. Pełny obraz zjawisk akustycznych w badanym obszarze może dać jedynie obserwacja przestrzennych przepływów energii akustycznej. Związane jest to z koniecznością pomiaru zarówno ciśnienia akustycznego – wielkości skalarnej, jak i prędkości akustycznej – wielkości wektorowej. Dopiero uchwycenie zależności między

tymi wielkościami daje możliwości pełnego opisu pola akustycznego za pomocą rozkładu wektora natężenia dźwięku. Skomplikowanie i czasochłonność pomiarów ciągle stoi na przeszkodzie powszechności stosowania badań natężeniowych. Innym problemem jest to, że pomiar natężenia dźwięku odbywa się z wykorzystaniem sondy, w której zintegrowane są czujniki ciśnienia i prędkości, a sonda ta posiadając skończone wymiary wprowadza zaburzenie do badanego pola. Stąd w ostatnich latach dużym zainteresowaniem akustyków cieszą się bezinwazyjne laserowe metody anemometryczne. Jest to laserowa anemometria obrazowa (ang. Particle Image Velocimetry, PIV) oraz laserowa anemometria dopplerowska (ang. Laser Doppler Anemometry, LDA). W dalszej części artykułu skupiono się na wykorzystaniu danych uzyskanych metodą PIV, która odpowiednio zaadaptowana daje możliwość obrazowania rozkładu pola prędkości akustycznej w obszarze płaszczyzny pomiarowej. Ogólną wadą obu metod laserowych jest brak możliwości bezpośredniego pomiaru ciśnienia akustycznego. Stąd wysiłek wielu naukowców koncentruje się na metodach odtwarzania rozkładu ciśnienia metodami numerycznymi na bazie zmierzonych rozkładów prędkości.

W artykule skoncentrowano się na sposobie obrazowania kierunkowego pola wartości skutecznych prędkości akustycznej, jako pewnym pośrednim sposobie wizualizacji zjawisk zachodzących w polu akustycznym: już nie wizualizacji czysto skalarnej, jak w przypadku ciśnienia i jeszcze nie tak pełnej (lecz wykonawczo trudnej lub niemożliwej), jak w przypadku obrazowania wektora natężenia dźwięku.

## 2. Obrazowanie pola akustycznego

Poprzez obrazowanie pola akustycznego będziemy rozumieć przedstawianie w postaci graficznej płaskiego lub przestrzennego rozkładu amplitud określonego parametru pola akustycznego. W przypadku przestrzeni wypełnionej falami akustycznymi do dyspozycji mamy szereg parametrów, z których najczęściej, ze względu na praktyczną przydatność, obrazowany jest rozkład ciśnienia akustycznego, prędkości akustycznej bądź natężenia dźwięku. Parametry te można uzupełnić pojęciem impedancji akustycznej. Trzeba przy tym pamiętać, że pojęcie impedancji jest dobrze ugruntowane na bazie akustyki liniowej. W przypadku rozpatrywania zjawisk nieliniowych jej definicje i znaczenie mogą być różnie interpretowane. Wektor natężenia dźwięku definiujemy jako [4]:

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) \cdot p(t) dt \quad (1)$$

gdzie przez  $p(t)$  oznaczamy ciśnienie akustyczne (chwilowe),  $\vec{u}$  prędkość akustyczną. Wektor  $\vec{I}$  reprezentuje wektor składowej czynnej natężenia dźwięku.

Pomiędzy wielkościami akustycznymi występują analogiczne zależności, jak w przypadku wielkości elektrycznych, jakimi są napięcie, prąd, moc i impedancja elektryczna.

Ważnym przypadkiem szczególnym dla pola akustycznego jest założenie, że między ciśnieniem a prędkością nie ma przesunięcia fazowego. W akustyce taka sytuacja ma miejsce w tzw. polu dalekim w przypadku rozchodzenia się fali płaskiej. Wtedy impedancja ma wartość rzeczywistą:

$$\bar{I} = p_{rms} \cdot u_{rms} = \frac{p_{rms}}{\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{Z} \quad (2)$$

gdzie  $\bar{I}$  jest składową czynną natężenia dźwięku,  $\rho$  gęstością ośrodka,  $c$  prędkością rozchodzenia się fali w danym ośrodku, a  $p_{rms}$  wartością skuteczną ciśnienia akustycznego:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3)$$

Wzór (2) jest podstawą inżynierskich obliczeń rachunkowych, w których mówi się o równoważności liczbowej poziomu natężenia dźwięku  $L_{\bar{I}}$  i poziomu ciśnienia akustycznego  $L_p$ :

$$L_{\bar{I}} = 10 \log \frac{\bar{I}}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p_{rms}^2}{Z}}{\frac{p_{rms0}^2}{Z}} = 20 \log \frac{p_{rms}}{p_{rms0}} = L_p \quad (4)$$

Podstawową wadą takiego podejścia jest pominięcie informacji o kierunku przepływu energii akustycznej w przestrzeni. Obrazowanie rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego  $L_p$  jest więc głównie sposobem na wizualizację skutków rozchodzenia się fal akustycznych w danym obszarze, lecz nie niesie informacji o kierunkowości tego pola, co w wielu przypadkach jest kluczowe (np. w celu wskazania źródeł hałasu).

Zakładając izotropowość ośrodka, analogicznie do (2) można otrzymać, że

$$\bar{I}_x = (u_{rms}^x)^2 \cdot \bar{Z} \quad (5)$$

$$\bar{I}_y = (u_{rms}^y)^2 \cdot \bar{Z} \quad (6)$$

$$\bar{I}_z = (u_{rms}^z)^2 \cdot \bar{Z} \quad (7)$$

i analogicznie dalej

$$L_{\bar{I}_x} = 10 \log \frac{\bar{I}_x}{I_0} = 20 \log \frac{u_{rms}^x}{u_{rms0}^x} = L_{u_x} \quad (8)$$

$$L_{\bar{I}_y} = 10 \log \frac{\bar{I}_y}{I_0} = 20 \log \frac{u_{rms}^y}{u_{rms0}^y} = L_{u_y} \quad (9)$$

$$L_{\bar{I}_z} = 10 \log \frac{\bar{I}_z}{I_0} = 20 \log \frac{u_{rms}^z}{u_{rms0}^z} = L_{u_z} \quad (10)$$

gdzie  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  a  $u_{rms0} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$  są odpowiednio wartościami odniesienia dla natężenia i prędkości akustycznej.

Przy takim podejściu dysponujemy trzema składowymi poziomami prędkości akustycznej  $L_{u_i}$ . Na ich podstawie możemy określać moduł wypadkowego poziomu prędkości akustycznej, lecz nie możemy ich traktować jako składowych wektora wskazującego prawidłowy kierunek transportu energii akustycznej. Choć punktem wyjścia była wielkość wektorowa (chwilowa prędkość akustyczna), przedstawione klasyczne przekształcenia nie dają możliwości obrazowania poziomu prędkości akustycznej w inny sposób niż w postaci rozkładu wielkości skalarnej.

### 3. Obrazowanie pola prędkości za pomocą laserowej anemometrii obrazowej

Podstawową cechą płynów takich jak powietrze czy woda jest ich homogeniczność oraz optyczna przezroczystość. Powoduje to, że ruch tych ośrodków nie jest zauważalny. Jeżeli jednak płyn zostanie zanieczyszczony dymem czy innymi drobinami, ruch płynu jest łatwy do zobrazowania. Z tego więc powodu przy korzystaniu z anemometrii laserowej do badanego płynu dodawane są cząsteczki zwane posiewem. W technice PIV zakłada się, że cząsteczki posiewu są wystarczająco małe i pozwalają śledzić rzeczywistą drogę, jaką pokonują cząsteczki płynu. Rozwój technologii zbierania danych i przetwarzania obrazu pozwolił na rozwinięcie nowej techniki gromadzenia danych ilościowych i jakościowych na temat chwilowych rozkładów pól prędkościowych w płynie. Cząstki posiewu oświetlane są płaską warstwą światła lasera impulsowego o podwójnym błysku. Światło rozpraszane na cząstkach posiewu jest rejestrowane kamerami cyfrowymi CCD. Typowo wykonuje się dwa zdjęcia posiewu w krótkim i regulowanym odstępie czasu. Algorytmy korelacji wzajemnej pozwalają na określenie kierunku, zwrotu i prędkości poruszającego się płynu. PIV jest bezinwazyjną metodą pomiaru prędkości, która wymaga optycznego dostępu do badanego obszaru dla oświetlenia i kamer. Ważnym zagadnieniem w PIV jest także dobranie koncentracji posiewu, żeby był on jednolicie rozprzeczony w oświetlonej warstwie płynu. Pomiaru PIV w porównaniu do pomiarów innymi technikami posiadają znaczną przewagę w postaci możliwości wyznaczania rozkładu wektorowego pola prędkości jednocześnie w całej oświetlonej warstwie (2D).

### 4. Zastosowanie PIV w akustyce

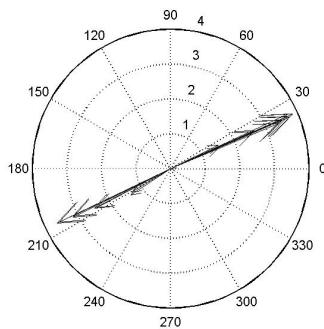
Zastosowanie PIV do wizualizacji prędkości akustycznej (inaczej prędkości cząstek akustycznych) wymaga dodatkowych zabiegów związanych z oscylacyjnym ruchem cząstek akustycznych o częstotliwości wymuszenia. Dysponując kamerami o częstotliwości akwizycji 15Hz pojawia się problem odpowiedniej częstotliwości pozyskiwania danych. Zgodnie z twierdzeniem Shannona, aby odtworzyć w pełni przebieg prędkości akustycznej o określonej częstotliwości, musimy zbierać dane z częstotliwością co najmniej dwukrotnie większą, niż częstotliwość maksymalna sygnału. W przypadku drgań akustycznych jest to trudne do spełnienia wprost ze względu na szybkość pracy kamer rejestrujących obrazy wejściowe do systemu PIV. Najszybsze obecnie kamery CCD mogą dokonywać akwizycji obrazów z częstotliwością rzędu pojedynczych kiloherców, a bardziej dostępne systemy o odpowiednio dużej rozdzielczości optycznej dysponują z reguły częstotliwością rzędu kilkunastu Hz. W przypadku drgań akustycznych są to wartości uniemożliwiające w sposób bezpośredni odtwarzanie przebiegu zmian w polu akustycznym na podstawie ciągu próbek wartości chwilowej sygnału. W tym celu wprowadza się z reguły założenie, że zjawiska akustyczne będące przedmiotem badań są w stanie ustalonym, a więc powtarzają się cyklicznie w sposób stacjonarny przez odpowiednio długi czas. Przy takim założeniu odpowiednią rozdzielczość czasową jesteśmy w stanie uzyskać dzięki akwizycji w ścisłej synchronizacji z sygnałem wymuszającym w kolejnych jego fazach w ciągu określonej liczby okresów. Wymaga to od zastosowanego systemu PIV odpowiednich możliwości synchronizacji pracy kamer i laserowego źródła impulsów świetlnych względem zewnętrznego sygnału wymuszającego.

### 5. Obrazowanie pola prędkości akustycznej

Dla wielkości fizycznych zmiennych w czasie wartości średniokwadratowe (rms) oblicza się m.in. w celu umożliwienia porównywania skutków energetycznych, jakie wytwarzają. Jak wspomniano wcześniej w przypadku obrazowania ciśnienia akustycznego traci się informacje kierunkowe. Aby temu zapobiec proponuje się obrazowanie pola akustycznego w postaci prze-

strzennego rozkładu prędkości akustycznej reprezentowanego w postaci odcinków skierowanych. Długość każdego odcinka jest proporcjonalna do wypadkowego poziomu prędkości akustycznej obliczanego zgodnie z (8)-(10) a jego orientacja przestrzenna dla danego punktu obrazowanego pola wyznaczana jest na podstawie analizy rozkładu orientacji przestrzennej wartości chwilowych prędkości akustycznej (analiza fazowa wektora prędkości). Na rysunku 1 pokazano zbiór 20 wektorów odpowiadających prędkościom zmierzonym w jednym punkcie w różnych fazach wymuszenia. Każdy z pokazanych wektorów jest uśrednionym wektorem z 50 pomiarów.

Jak widać wektory skupione są wokół pewnego kierunku padania fali akustycznej w stosunku do przyjętego układu współrzędnych odniesienia. Z racji przemienności zwrotu drgań, wektory mają różne zwroty. W chwili przejścia z wartości chwilowych na wartości skuteczne (rms), poza informacją o amplitudzie sygnału, można dodatkowo zachować informację o kierunku padania fali. Kierunek ten będzie obrazowany. W celu obliczenia wypadkowego kąta obrazowania można zastosować szereg algorytmów. Ze względu na możliwość występowania drgań złożonych zaproponowano użycie średniej ważonej, gdzie wagami są chwilowe wartości długości wektorów. Dzięki temu w wypadkowym kierunku największy udział będą miały wartości kątów obliczone na podstawie danych zmierzonych z możliwie wysokim stosunkiem sygnału do szumu. Przez sygnał rozumiemy mierzone wartości chwilowe prędkości akustycznej związanej z wymuszeniem, a przez szum - prędkości niezwiązane z głównym przepływem energii akustycznej.



Rys. 1. Zbiór wektorów obrazujący wartości chwilowe prędkości akustycznej zmierzone w wybranym punkcie pola w kolejnych fazach wymuszenia  
Fig. 1. The set of vectors of the instantaneous velocity of sound measured at a selected point of the field in subsequent phases of excitation

Dla przypadku dwuwymiarowego kąt wizualizacji obliczany będzie ze wzoru 11.

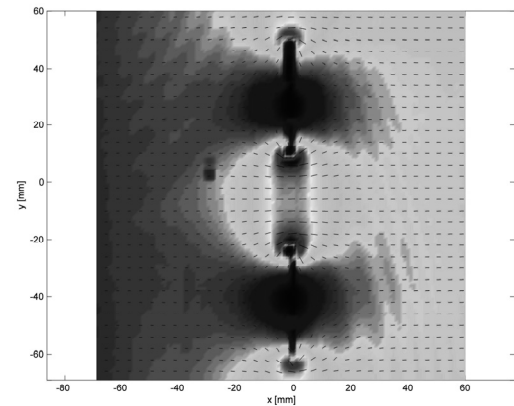
$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot |u_i|}{\sum_{i=1}^N |u_i|} - \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

gdzie  $\alpha_i = \arg(u_x + ju_y)$ .

## 6. Wyniki

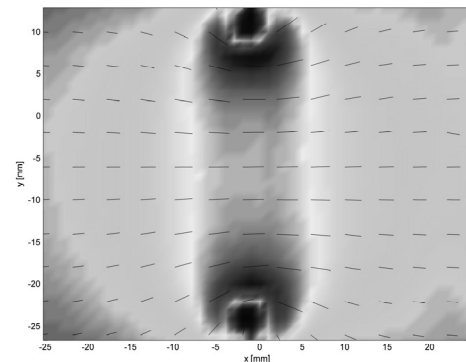
Prezentowane wyniki badań uzyskane zostały dzięki zastosowaniu systemu PIV z kamerami monochromatycznymi o rozdzielczości 4 Mpix i częstotliwości max. 15Hz. Obiektem zainteresowania było zaburzenie pola akustycznego wokół przeszkody kołowej z otworem umieszczonej w falowodzie o przekroju kwadratowym. Sygnałem wymuszenia był ton o częstotliwości 500Hz i poziomie ciśnienia  $L_p$  około 130 dB (w stosunku do  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa) W trakcie badań okres sygnału wymuszającego podzielono na 20 kolejnych faz i synchronicznie do każdej z nich zebrano po 50 obrazów. Rozkład pola prędkości wokół przeszkody pokazano na rys. 2. Mapa barwna oraz długości poszczególnych odcinków

reprezentują wartości skuteczne amplitud prędkości. Dodatkowo odcinki wyrysowane są w kierunkach obliczonych zgodnie z formułą (11).



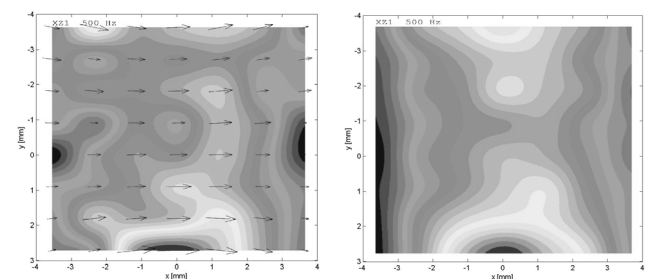
Rys. 2. Rozkład pola prędkości akustycznej wokół przeszkody (PIV): mapa barwna wartości rms prędkości z naniesionym proponowanym sposobem wizualizacji pola kierunkowego. Widok z góry  
Fig. 2. The distribution of the acoustic velocity field around the obstacle (PIV): a colourful map of the rms velocity with image visualisation of the proposed method of directional fields. View from the top

Powiększony fragment ograniczony do przepływu przez otwór w przeszkodzie pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Kierunkowy i amplitudowy rozkład pola prędkości akustycznej w rejonie otworu  
Fig. 3. Directional and amplitude distribution of acoustic velocity field in the area of the hole

Dla porównania obiekt zeskanowano zautomatyzowanym systemem do pomiaru natężenia dźwięku z sondą Microflown w siatce 3x3 mm w polu 7x8 punktów, co pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Rozkład pola akustycznego w otworze przeszkody uzyskany systemem natężeniowym: mapa barwna modułu prędkości (lewy) i mapa barwna modułu i rozkład wektora natężenia dźwięku (prawy)  
Fig. 4. Distribution of the acoustic field in the obstacle hole obtained with a sound intensity system: module-speed colour map (left) and colour map of the module and distribution of the sound intensity vector (right)

Porównując powyższe rysunki można wstępnie wysnuć następujące wnioski:

- zaletą techniki PIV jest wyższa rozdzielczość przestrzenna pomiarów oraz nieinwazyjność;
- obrazowanie modułów prędkości akustycznej dwiema metodami daje jeszcze w tym zakresie częstotliwości jakościowo zbliżone wyniki;
- w prezentowanych przykładach kierunkowość pola prędkościowego jest zgodna z kierunkowością pola natężeniowego, a więc ten sposób obrazowania daje więcej informacji o zjawiskach występujących w polu bez konieczności pomiaru bądź wyliczania ciśnienia;
- pełną wiedzę o zjawiskach w polu można uzyskać wyłącznie na bazie wektorowego rozkładu natężenia dźwięku, gdyż jedynie tam uwzględnione są zależności fazowe między przebiegiem wartości chwilowych ciśnienia akustycznego i prędkości cząstki akustycznej a zwroty wektorów informują o zwrocie przepływu energii akustycznej.

*Artykuł powstał dzięki możliwości korzystania z aparatury naukowo-badawczej Zespołu Wibroakustyki Stosowanej Wydziału Techniki Morskiej i Transportu ZUT.*

## 7. Literatura

- [1] Raffel M., Willert Ch., Wereley S., Kompenhans J.: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide (Experimental Fluid Mechanics). Springer, 2007.
- [2] Tropea C., Yarin A., Foss J.: Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Springer, 2007.
- [3] Weyna S: Rozpływ energii akustycznych źródeł rzeczywistych. Wydawnictwo WNT, 2005.
- [4] Fahy F: Sound Intensity, CRC Press, 1995.

*otrzymano / received: 23.08.2012*

*przyjęto do druku / accepted: 01.10.2012*

*artykuł recenzowany / revised paper*

## INFORMACJE

# Newsletter PAK

Wydawnictwo PAK wysyła drogą e-mailową do osób zainteresowanych Newsletter PAK, w którym są zamieszczone:

- spis treści aktualnego numeru miesięcznika PAK,
- kalendarz imprez branżowych,
- ważniejsze informacje o działalności Wydawnictwa PAK.

Newsletter jest wysyłany co miesiąc do osób, które w jakikolwiek sposób współpracują z Wydawnictwem PAK (autorzy prac opublikowanych w miesięczniku PAK, recenzenci, członkowie Rady Programowej, osoby które zgłosiły chęć otrzymywania Newslettera).

Celem inicjatywy jest umocnienie w środowisku pozycji miesięcznika PAK jako ważnego i aktualnego źródła informacji naukowo-technicznej.

Do newslettera można zapisać się za pośrednictwem:

- strony internetowej: [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl), po dodaniu swojego adresu mailowego do subskrypcji,
- adresu mailowego: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl), wysyłając swoje zgłoszenie.

Otrzymywanie Newslettera nie powoduje żadnych zobowiązań ze strony adresatów. W każdej chwili można zrezygnować z otrzymywania Newslettera.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK

## Bezpłatny dostęp do artykułów opublikowanych w PAK

Realizując idee Open Access przez miesięcznik PAK informujemy, że artykuły opublikowane w PAK są dostępne w wersji elektronicznej. Dostęp do artykułów opublikowanych jest bezpłatny, z zachowaniem 1 roku karencji.

Artykuły w łatwy sposób można znaleźć korzystając z wyszukiwarki artykułów. Bazę artykułów można przeszukać po nazwisku autora, tytule artykułu lub po słowach kluczowych.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK