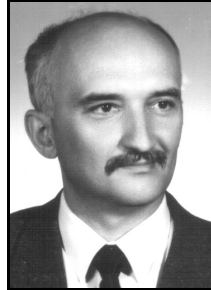


**Jarosław SIKORA, Leszek SZCZEPANIAK**  
POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA AUTOMATYKI I METROLOGII  
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

## Analiza wrażliwościowa spektrometru mas z innowacyjnym układem polaryzacji źródła elektronów

Dr hab. inż. Jarosław SIKORA

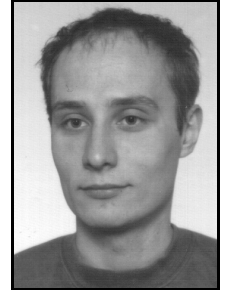
Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w 1980r i na Wydziale Matematyczno-Fizyczno-Chemicznym UMCS w 1987r. Pracę doktorską obronił w 1995r, habilitacyjną w 2006r na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe to doskonalenie parametrów metrologicznych próżniowych przyrządów pomiarowych, modelowanie układów sterowania gazowymi źródłami jonów oraz spektrometria mas.



e-mail: jaroslaw.sikora@pollub.pl

Dr inż. Leszek SZCZEPANIAK

Od 2001 roku pracownik Katedry Automatyki i Metrologii Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Doktorat obroniony w 2008 roku, obecnie pracuje jako adiunkt. Zajmuje się zagadnieniami poprawy parametrów metrologicznych próżniowych przyrządów pomiarowych.



### Streszczenie

Praca prezentuje wyniki badań wrażliwości spektrometru mas z nowatorskim układem polaryzacji źródła elektronów, zapewniającym niezależny dobór natężenia prądu emisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest wyznaczenie wrażliwości natężenia prądu jonowego niezależnie względem natężenia prądu emisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony. Badania objęły również pozostałe charakterystyki spektrometru mas oraz wrażliwości natężenia prądu jonowego względem ciśnienia i napięcia przyspieszającego jony. Wyniki potwierdzają zalety nowego rozwiązania w spektrometrze mas.

**Słowa kluczowe:** wrażliwość, spektrometr mas, układ polaryzacji, prąd jonowy, prąd emisji elektronowej, napięcie przyspieszające.

### Sensitivity analysis of mass spectrometer with innovative biasing system of an electron source

#### Abstract

The sensitivity measurement results of a mass spectrometer (Fig. 1) with an innovative biasing system in an electron source [1] are presented. The biasing system ensures that an accelerating voltage and an electron emission current are independent of each other. Owing to that, the sensitivity of an ion current versus the electron emission current (Fig. 2), and independently versus the electron accelerating voltage (Fig. 3) can be determined. The researches included the determination of the mass spectrometer characteristics and sensitivity of the ion current in function of a pressure (Fig. 4.) and the ion current in function of an ion accelerating voltage (Fig. 5, Fig. 6). The results confirm that new biasing system is highly suitable for the mass spectrometer.

**Keywords:** sensitivity, mass spectrometer, biasing system, ion current, electron emission current, accelerating voltage.

## 1. Wprowadzenie

Dokładność i powtarzalność pomiarów realizowanych za pomocą próżniowych przyrządów pomiarowych wyposażonych w gazowe źródła jonów z termoelektronową wiązką jonizującą, np. próżniomierzy, spektrometrów mas, zależy w znaczącym stopniu od jakości parametrów wiązki elektronowej (jonizującej). Jonizacja termoelektronowa w dużej mierze zależy od odpowiednich parametrów wiązki jonizującej. W Katedrze Automatyki i Metrologii Politechniki Lubelskiej został zaprojektowany i wykonany układ polaryzacji źródła elektronów z gorącą katodą, zapewniający niezależny dobór i wysoką stabilność długoczasową natężenia prądu emisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony [1]. Synteza układu polaryzacji została przeprowadzona w oparciu kryterium wrażliwości [2]:

$$\frac{\partial U_e}{\partial I_e} = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $U_e$  – napięcie przyspieszające elektrony,  $I_e$  – natężenie termoelektronowej wiązki jonizującej.

Opracowany układ został wykorzystany w Katedrze do pomiarów pracy wyjścia elektronów z metali [3] oraz w spektrometrze mas z gazowym źródłem jonów.

W niniejszej pracy zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych spektrometru mas z nowym układem polaryzacji źródła elektronów, w formie charakterystyk statycznych natężenia prądu jonowego  $I_j$ , w funkcji natężenia prądu emisji elektronowej  $I_e$ , napięcia przyspieszającego elektrony  $U_e$ , napięcia przyspieszającego jony  $U_j$  oraz ciśnienia gazu  $p$ . Wrażliwości mierzonych względem wielkości  $x_i$  wyznaczono według poniższej zależności:

$$S_{I_j, x_i} = \frac{dI_j}{x_i} \quad (2)$$

gdzie  $i=1...4$ .

Ocenę jakości nowego rozwiązania przeprowadzono w oparciu o analizę składników różniczki zupełnej natężenia prądu jonowego.

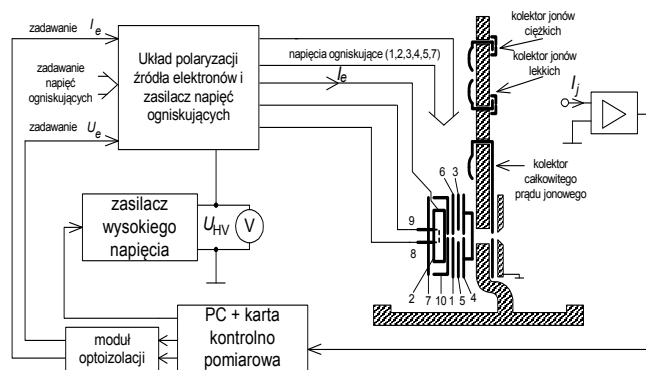
## 2. Stanowisko pomiarowo-badawcze

W celu prowadzenia badań nad poprawą parametrów próżniowych przyrządów pomiarowych w Katedrze Automatyki i Metrologii zostało zbudowane specjalistyczne stanowisko pomiarowe [4], wyposażone w spektrometr mas, pompy próżniowe, próżniomierz jonizacyjny oraz zespół wymiennych głowic jonizacyjnych Bayarda-Alperta.

Na rys. 1 jest przedstawiony schemat blokowy spektrometru mas oraz układu pomiarowo-zasilającego.

Część elektroniczna obejmuje układ polaryzacji źródła elektronów [1], zasilacz napięć ogniskujących dla źródła jonów, zasilacz wysokiego napięcia oraz układ pomiarowy wspomagany komputerowo. Ze względu na to, że źródło jonów znajduje się na wysokim potencjale względem ziemi (rzędu setek woltów), sygnały sterujące źródłem jonów są podawane poprzez łącze światłowodowe.

Elektrony emitowane z katody (8, 9) są przyspieszane w kierunku pałapki elektronowej (2). W komorze jonizacyjnej (10) zderzając się z cząsteczkami gazu powodują jego jonizację. Powstała w ten sposób wiązka jonowa jest kierowana poprzez elektrodę wypychającą (7) w kierunku elektrod ekstrakcyjnych (1 i 6) oraz ogniskujących przestrzennie (3, 4, 5).

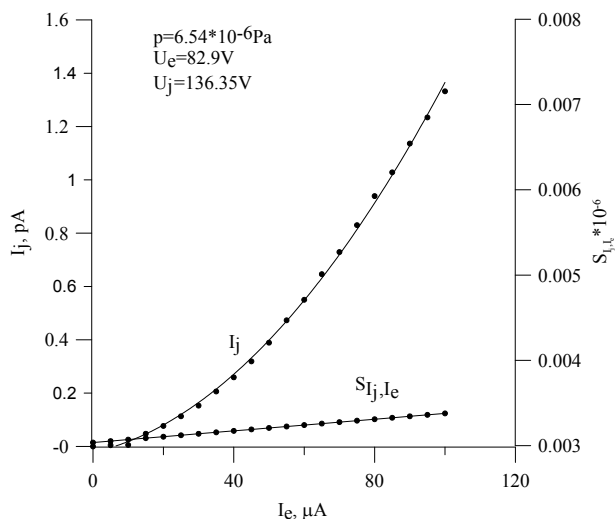


Rys. 1. Schemat blokowy spektrometru mas i układu pomiarowo-zasilającego  
Fig. 1. Block diagram of mass spectrometer, measurement system and power supply

Strumień jonów w obszarze stałego pola magnetycznego odchyłany w zależności od ilorazu masy  $m$  do ładunku  $e$  jest kierowany do odpowiedniego kolektora, do którego jest dołączony przetwornik prąd-napięcie. Wyjściowy sygnał napięciowy jest podawany na wejście karty pomiarowej.

### 3. Wyniki badań

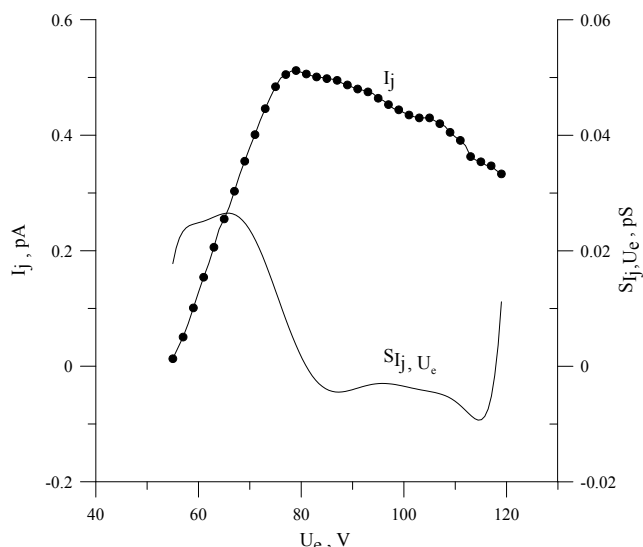
Zastosowanie nowego układu polaryzacji źródła elektronów, który zapewnia niezależny dobór natężenia prądu emisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony umożliwia pomiary natężenia prądu jonowego w funkcji natężenia prądu emisji elektronowej przy ustalonej wartości napięcia przyspieszającego elektrony. Pomiary charakterystyki  $I_j(I_e)$  przeprowadzono dla zadanych wartości ciśnienia oraz napięć przyspieszających elektrony i jony. Na rys. 2 jest przedstawiony wykres tej zależności oraz wartości pozostałych wielkości. W oparciu o zależność (3) wyznaczono wrażliwość natężenia prądu jonowego względem natężenia prądu emisji elektronowej, którą również przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zależność natężenia prądu jonowego  $I_j$  w funkcji natężenia prądu emisji elektronowej  $I_e$   
Fig. 2. Ion current  $I_j$  versus electron emission current  $I_e$

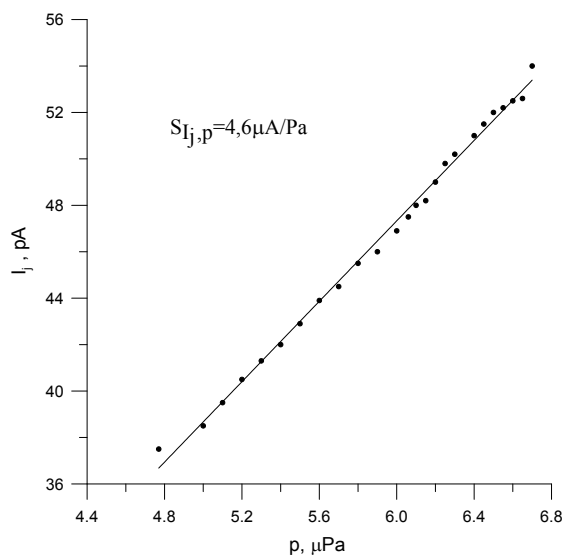
Kolejne wyniki pomiarów tj. natężenia prądu jonowego w funkcji napięcia przyspieszającego elektrony, przy stałym natężeniu prądu emisji elektronowej oraz wyznaczony przebieg wrażliwości są przedstawione na rysunku 3. Natężenie prądu jonowego, które jest miarą wydajności jonizacji, posiada charakterystyczne maksimum dla optymalnej wartości napięcia przyspieszającego elektrony a więc i optymalnej energii kinetycznej elektronów. Powyżej tej energii zderzenia elektronów z jonami stają się elastyczne i wydajność jonizacji maleje.

jącego elektrony a więc i optymalnej energii kinetycznej elektronów. Powyżej tej energii zderzenia elektronów z jonami stają się elastyczne i wydajność jonizacji maleje.



Rys. 3. Zależność natężenia prądu jonowego  $I_j$  w funkcji napięcia przyspieszającego elektrony  $U_e$   
Fig. 3. Ion current  $I_j$  versus electron accelerating voltage  $U_e$

Na rys. 4 została przedstawiona charakterystyka natężenia prądu jonowego w funkcji ciśnienia oraz przebieg wrażliwości względem ciśnienia.

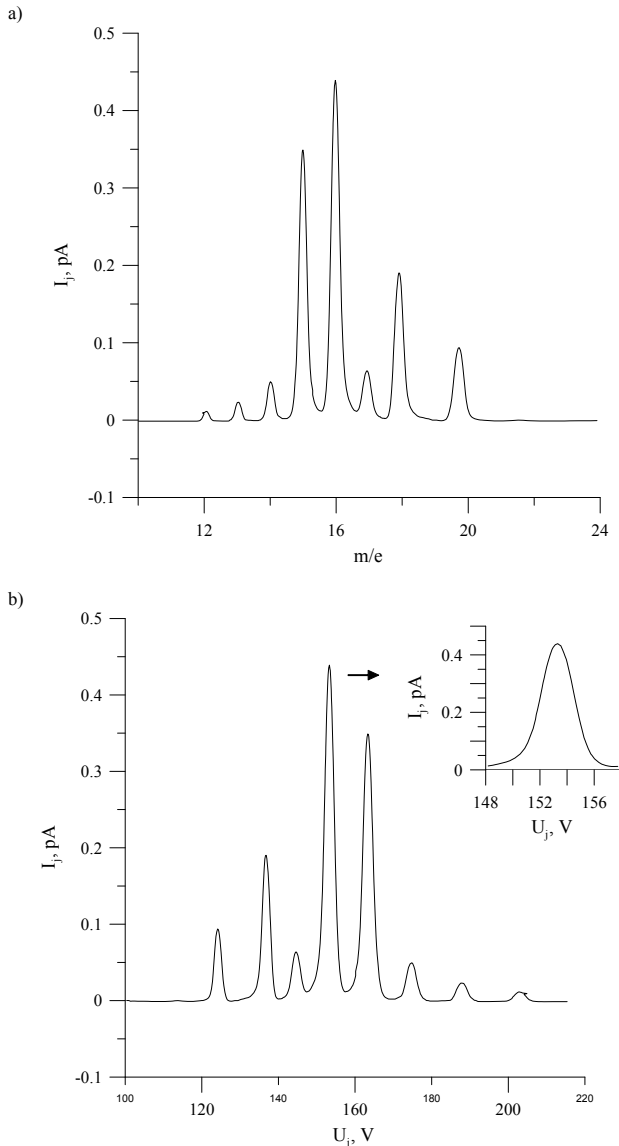


Rys. 4. Zależność natężenia prądu jonowego  $I_j$  w funkcji ciśnienia  $p$   
Fig. 4. Ion current  $I_j$  versus pressure  $p$

Wynikiem pomiarów realizowanych za pomocą spektrometru mas jest tzw. widmo mas, czyli zależność natężenia prądu jonowego od ilorazu  $m/e$ , który jest z kolei funkcją napięcia przyspieszającego jony [5]:

$$\frac{m}{e} = \frac{r^2 B^2}{2U_j} \quad (3)$$

Na rys. 5 jest przedstawiony fragment widma mas próbki powietrza pobranej w Lublinie.



Rys. 5. a) Widmo mas, b) zależność natężenia prądu jonowego  $I_j$  od napięcia przyspieszającego jony  $U_j$

Fig. 5. a) Mass spectrum, b) ion current  $I_j$  versus ion accelerating voltage  $U_j$

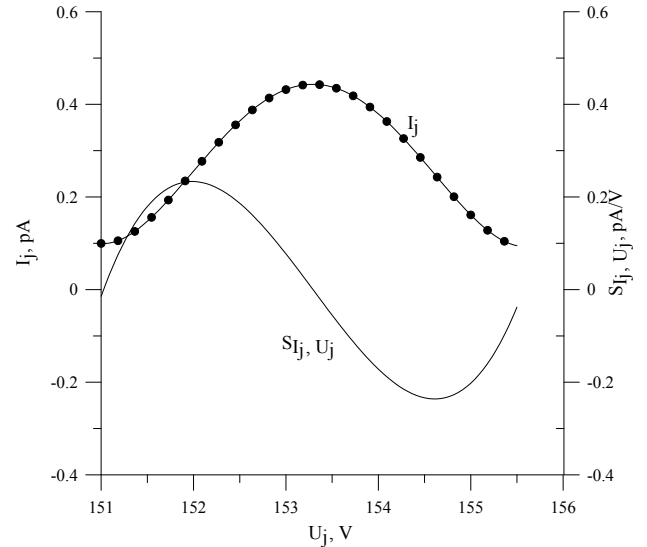
Z powyższego widma wybrano przykładowy wierzchołek odpowiadający ilorazowi  $m/e=16$  i po aproksymacji, dla tego zakresu napięć  $U_j$ , z zależności natężenia prądu jonowego w funkcji napięcia przyspieszającego jony, wyznaczono analitycznie wrażliwość (rys. 6).

Pomiary napięcia przyspieszającego elektrony oraz napięć będących miarą natężenia prądu emisji elektronowej (spadek napięcia na rezystorze wzorcowym) oraz natężenia prądu jonowego przeprowadzono za pomocą data acquisition/switch unit HP 34970. Pomiary napięcia przyspieszającego jony wykonano multimetrem Escort 3145A natomiast pomiary ciśnienia próżniomierzem jonizacyjnym TPG 256A. W badaniach widma mas wykorzystano kartę kontrolno-pomiarową Ambex LC-020-0812.

Wyznaczone współczynniki wrażliwości umożliwiają analizę składników błędu granicznego natężenia prądu jonowego:

$$\Delta_{\max} I_j = \sqrt{3[(S_{I_e, I_e} \Delta_{\max} I_e)^2 + (S_{I_j, U_e} \Delta_{\max} U_e)^2 + (S_{I_j, U_j} \Delta_{\max} U_j)^2 + (S_{I_j, p} \Delta_{\max} p)^2]} \quad (4)$$

Pierwszy i drugi składniki powyższego wyrażenia określają fluktuacje  $I_j$  spowodowane niestałością w czasie natężenia prądu emisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony i powinny być jak najmniejsze.



Rys. 6. Pojedynczy wierzchołek widma mas dla  $m/e=16$  oraz wrażliwość natężenia prądu jonowego

Fig. 6. Single peak of mass spectrum for  $m/e=16$  and sensitivity of ion current

Dla optymalnej wartości napięcia przyspieszającego elektrony (rys. 3), wartość drugiego składnika w wyrażeniu (4) jest równa zero, niezależnie od zadawanych wartości lub fluktuacji natężenia prądu elektronowego. Jest to podstawowa zaleta opracowanego układu polaryzacji źródła elektronów. Trzeci składnik wyrażenia (4), dla napięcia przyspieszającego jony odpowiadającego zerowej wartości wrażliwości (rys. 6), przyjmuje również wartość zero. W oparciu o wyznaczone wrażliwości i przyjmując typowe warunki pracy źródła jonów, relacja między pierwszym i czwartym składnikiem wyrażenia (4), może być zapisana jak poniżej:

$$S_{I_j, I_e} \Delta_{\max} I_e \ll S_{I_j, p} \Delta_{\max} p \quad (5)$$

W rezultacie, na podstawie wyrażen (4) i (5) można stwierdzić, iż zmiany natężenia prądu jonowego są miarą zmian ciśnienia parcjalnego, odpowiednio do wybranego ilorazu  $m/e$ . Jest to potwierdzenie, iż nowy układ polaryzacji źródła elektronów zastosowany w spektrometrze mas zmniejsza fluktuacje natężenia prądu jonowego spowodowane fluktuacjami parametrów wiązki elektronowej, w porównaniu z dotychczasowymi rozwiązaniami np. [6].

## 4. Podsumowanie

Aplikacja w spektrometrze mas układu polaryzacji źródła elektronów zapewniającego niezależny dobór parametrów wiązki elektronowej daje możliwość przeprowadzenia badań wrażliwości natężenia prądu jonowego niezależnie względem natężenia prądu elektronowego i napięcia przyspieszającego elektrony oraz z uwagi na wysoką stabilność długoczasową tych wielkości zmniejsza fluktuacje natężenia prądu jonowego. Uzyskanie powtarzalnych charakterystyk natężenia prądu jonowego względem natężenia prądu emisji elektronowej lub napięcia przyspieszającego elektrony było w dotychczasowych układach utrudnione, ze względu na wzajemną zależność w/w wielkości. W prezentowanym rozwiązaniu wady tej nie ma, co umożliwia łatwy i precyzyjny dobór punktu pracy źródła elektronów i jego ponowne odtworzenie dla badań porównawczych.

## 5. Literatura

- [1] Sikora J.: Dual application of a biasing system to an electron source with a hot cathode, Meas.urement Sci.ence and Technol.ogy, Institute of Physics Publishing, 15, 2004, N10-14.

- [2] Sikora J.: Synteza układu polaryzacji źródła elektronów dla przyrządów pomiarowych w oparciu o kryterium wrażliwości, Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica 18-22 września 2005, KM AGH 2005, 81-88.
- [3] Durakiewicz T., Sikora J., Hałas S.: Work function variations of incandescent filaments during self-cooling in vacuum, Vacuum, Elsevier Ltd., 80, 2006, 894-898.
- [4] Szczepaniak L., Sikora J.: Stanowisko pomiarowe do badania próżniowych przyrządów pomiarowych z gorącą katodą w stanach statycznych i dynamicznych, Przegląd Elektrotechniczny, SIGMA-NOT, 3, /2008, 270-272.
- [5] Johnstone R.A.W., Rose M. E.: Spektrometria mas, PWN, Warszawa, 2001.
- [6] Hałas S., Sikora J.: Electron emission stabiliser with double negative feedback loop, Meas. Sci. Technol., Institute of Physics Publishing, 1, 1990, 980-982.

*otrzymano / received: 23.11.2011*

*przyjęto do druku / accepted: 02.02.2012*

*artykuł recenzowany / revised paper*

## INFORMACJE

# Wydawnictwo PAK

specjalizuje się w wydawaniu czasopisma *Pomiary Automatyka Kontrola* i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa  
ul. Świętokrzyska 14A  
tel./fax 22 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice  
ul. Akademicka 10, p. 30b  
tel./fax 32 237 19 45  
e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl)

[www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)

## 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