

**Damian ŚMIERZCHALSKI, Leszek RÓŻAŃSKI**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, pl. Marii Skłodowskiej Curie 5, 60-965 Poznań

**Światło białe jako medium w pomiarze temperatury****Mgr inż. Damian ŚMIERZCHALSKI**

Doktorant Politechniki Poznańskiej a jednocześnie specjalista w zakresie badania właściwości materiałów w firmie ITA – K. Pollak, M. Wieczorowski Sp.j. W latach 2003 – 2008 studiował mechanikę i budowę maszyn na Politechnice Poznańskiej. Zainteresowania naukowe skupione wokół właściwości powierzchniowych materiałów z uwzględnieniem metod ich opisywania i pomiaru. W młodych latach aktywny pianista.



e-mail: ds@ita-polska.com.pl

**Mgr inż. Leszek RÓŻAŃSKI**

Ukończył automatykę i metrologię elektryczną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej oraz fizykę na Wydziale Matematyki Fizyki i Chemii Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu. Jest współautorem jednej książki oraz autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji i drukowanych referatów związanych z techniką termowizyjną. Zajmuje się teorią oraz konstrukcją systemów zobrazowania termalnego, diagnostyką termalną oraz wykorzystaniem systemów wizyjnych w metrologii wielkości geometrycznych.



e-mail: leszek.rozanski@gmail.com

**Streszczenie**

W artykule opisano szczególną aplikację termometru światłowodowego w warunkach produkcyjnych. Weryfikację dokładności i czasu reakcji sondy na wymuszenie poprzedzają podstawy termometrii tego rodzaju. Wnioski dotyczą możliwości stosowania tej rzadko spotykanej metody wraz z komentarzem parametrów technicznych urządzeń i wskazaniem potencjalnych aplikacji.

**Słowa kluczowe:** temperatura, pomiar, światłowód.**Visible light in temperature measuring process****Abstract**

Visible light, considered as an electromagnetic wave of 400 – 700 nm length, is becoming a useful medium in measuring techniques dominated by contact and non-contact systems based on infrared radiation emission. The first part of this paper describes the method (Fig. 1) and its basics [1, 2, 8] as well as the system classification [6, 7]. There are presented some fiber-optic thermometers [3, 4, 5] and available sensors (Fig. 2) as well as the possibility of signal capture from many sources. The measurement accuracy was verified (Figs. 3, 4, 5), then the method usefulness was characterized when considering hard industry conditions, in which specific points are hard to reach and electromagnetic fields may occur. Finally, a laboratory experiment was carried out and its results were compared with those obtained from a real industry application (6), located in a factory of the Polish inductive plates producer. The project assumed temperature measurement in situ during heating and this postulate was achieved thanks to the producer kindness. The next part refers to other possibilities that measuring instruments based on fiber optic technique can offer [9]. Efforts were concentrated on those fields in which other devices cannot be used, just to show the unique character of the process based on visible light. The conclusion presents some plans for the future research on fiber optic measuring technique. Its weaknesses are described as points for elimination. There is also emphasized the useful character of those system. The possible field of application is shown.

**Keywords:** temperature, measurement, fiber optic.**1. Termometria światłowodowa – podstawy****1.1. Przebieg sygnału**

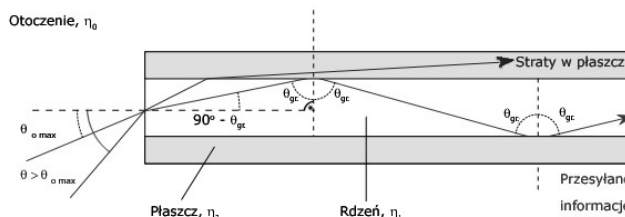
Fala rozchodzi się w ośrodku zgodnie z zasadą całkowitego wewnętrznego odbicia, o ile spełniony jest warunek nieprzekroczenia granicznego kąta padania promienia na granicę między ośrodkami. Zależność tę opisuje prawo odbicia i prawo załamania Snella [8]:

$$\theta_p = \theta_{od}, \quad (1)$$

$$\eta_1 \sin \theta_p = \eta_2 \sin \theta_z, \quad (2)$$

z których wyznacza się kąt graniczny:

$$\theta_{gr.} = \arcsin\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right). \quad (3)$$



Rys. 1. Kąty charakterystyczne i przebieg fali w światłowodzie  
Fig. 1. Characteristic angles and wave direction in fiber optic

Przy zachowaniu odpowiedniej zależności między współczynnikami odbicia płaszczu i rdzenia światłowodu (rys. 1), falę przesyła się na znaczne odległości. Strat części sygnału nie można wykluczyć, nie jest to jednak tematem opracowania, dlatego że z punktu widzenia pomiaru temperatury ważniejszy jest tzw. kąt akceptacji  $\theta_{o max}$ . Znając zależność między tym kątem a aperturą numeryczną  $NA$ :

$$NA = \eta_0 \sin \theta_{o max} = \eta_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{gr.}\right). \quad (4)$$

określa się kąt wierzchołkowy  $\alpha_W$  wirtualnego stożka umieszczonego na czole światłowodu, przez który należy wprowadzić falę, aby podlegała wewnętrznemu odbiciu.

$$\alpha_W \leq 2\theta_{o max}. \quad (5)$$

Wielkość ta ma wymiar praktyczny, ponieważ sugeruje konstrukcję elementu pomiarowego umieszczonego właśnie na zakończeniu światłowodu i dobór materiału płaszczu oraz rdzenia.

**1.2. Zasada pomiaru temperatury**

Element pomiarowy i jego konstrukcja jest ściśle związany z opisanymi powyżej zależnościami, chociaż w niektórych rozwiązaniach sygnał nie trafia do rdzenia przez czło światłowodu. W dostępnych urządzeniach budowa sensora zdefiniowana jest przez zasadę wykorzystywaną do pomiaru. Klasyfikację metod, ze względu na dominujące zjawisko, zaproponował m.in. Kaczmarek [7]:

– metoda natężeniowa (Przekształca się zmianę natężenia światła przebiegającego w światłowodzie na różnicę temperatur.)

- metoda zgięciowa (Porównuje się oczekiwany poziom absorpcji promieniowania charakterystyczny dla danego światłowodu z rzeczywistym, występującym na skutek mikro-zaginania światłowodu pod wpływem temperatury.) [1, 6]
- metoda fluorescencyjna (Ma złożony charakter, ponieważ analiz temperatury odbywa się poprzez czas, po jakim promieniowanie fluorescencyjne zanika. Zakończenie światłowodu z pokryciem fosforowym lub oliwinowo-forsterytowym na skutek promieniowania wzbudzonego emituje światło o częstotliwości fluorescencji. Detektor sygnalizuje spadek natężenia tego promieniowania, a szybkość wygaszania pozostaje w korelacji z temperaturą pokrycia.) [2, 7]
- metoda interferencyjna (Określa się temperaturę na podstawie odległości zwierciadła – analogia ze szczeliną interferometru – od końca światłowodu. Promieniowanie odbite od zwierciadła jest analizowane przez przetwornik obrazu, na którym powstają prążki interferencyjne. Pomiar nie jest możliwy bez wprowadzenia krzywych kalibracyjnych, z którymi porównywany jest układ prążków.) [3, 8]
- metoda odbiciowa (Korzysta się z odkształcenia elementu bimetalowego na skutek oddziaływania termicznego. Zmiana odległości tego elementu od czoła światłowodu jest podstawą do kalibracji układu pomiaru temperatury.)

Swoistą odmianą metody odbiciowej jest metoda wykorzystująca równomierną siatkę Bragga. Każda płaszczyzna siatki odbija i rozprasza padającą nań wiązkę. Superpozycja wiązek odbitych od wielu płaszczyzn daje falę Bragga o długości  $\lambda_B$ , której różnica przyjmuje następującą postać:

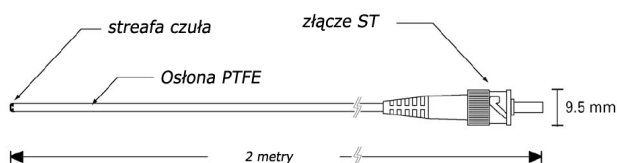
$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_e}{\partial l} + n_e \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_e}{\partial T} + n_e \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (6)$$

Pomijając pierwszy człon otrzymuje się zależność długości od temperatury, której pomiar polega w praktyce na analizie widma współczynnika mocy odbicia siatki. Wyjątkowość tej odmiany metody odbiciowej polega na możliwości dokonania pomiaru wydłużenia, co czyni światłowód z siatką Bragga przydatny do pomiaru wielkości geometrycznych [4].

Światłowody wykorzystujące wymuszone rozpraszanie stanowią osobną grupę sensorów, ponieważ pozwalają uzyskać rozkład temperatury w funkcji odległości. Odbywa się to poprzez zestawienie sygnału wejściowego czujnika z mocą rozproszenia wstecznego, do którego dochodzi na skutek oddziaływania celowo wprowadzanych niejednorodności w budowie światłowodu. Jeśli ich wymiary są wystarczająco małe w porównaniu z długością fali wejściowej, część światła ulega rozproszeniu wstecznemu, co bada się przy pomocy refraktometrów optycznych w dziedzinie czasu. Efektem jest rozkład mierzony na długości falowodu.

### 1.3. Weryfikacja dokładności pomiaru

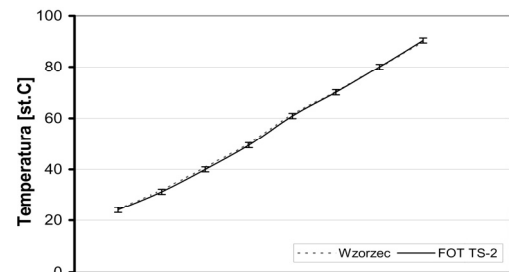
W analizowanym przypadku nie podejmowano oceny dokładności pomiaru rozkładu temperatury (producenci deklarują dokładność na poziomie 2-3°C, przy rozdzielczości temperaturowej rzędu 0,1°C i rozdzielczości próbkowania 1 m na długości przewodu 10 km). Analiza dotyczy pomiaru punktowego przetwornikiem TS2 z kondycjonerem 1-OEM, o konstrukcji zobrazonej na rys. 2.



Rys. 2. Budowa sondy termicznej TS2 FOTEMP [kat. producenta]  
Fig. 2. TS2 FOTEMP thermo sensor structure (manufacturer's cat.)

Wzorcowanie przy elemencie termoczułym w całości zanurzonym w cieczy o temperaturze regulowanej ultratermostatem (VEM MLW PRÜFGERÄTE –Werk Medingen typ U 8) i kontrolowanej termoparą (PT100  $\alpha$ ) z kalibratorem czujników rezystancyjnych UNICAL RTD. Układ ten zapewnia dokładność pomiaru  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  i służy jako punkt odniesienia dla wzorcowania termometru światłowodowego. Średnica elementu termoczułego  $\varnothing = 1,2$  mm, jego długość  $l = 10$  mm. Dokładność pomiaru wg karty charakterystyki  $\pm 1^\circ\text{C}$  w zakresie 0 – 300°C, zatem spełniony jest wymóg 10-krotnie wyższej dokładności pomiaru temperatury odniesienia. Czas odpowiedzi  $t_{90} = 2$  s.

Na rys. 3 porównano odczyty z termopary i z sondy światłowodowej, a ponieważ odnotowano bardzo niewielkie odchyłki, wyniki zilustrowano również tabelarycznie.



Rys. 3. Dokładność sondy TS-2 względem PT100 $\alpha$

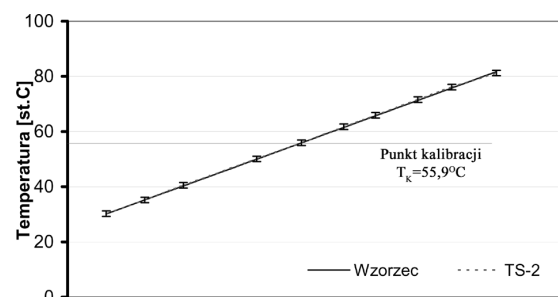
Fig. 3. Accuracy of TS-2 sensor referred to PT100 $\alpha$

Tab. 1. Weryfikacja dokładności sondy TS2 (kalibracja fabryczna)

Tab. 1. Accuracy of TS2 sensor verification (manufacturer's calibration)

Lp.	T <sub>PT100</sub> [°C]	T <sub>TS1</sub> [°C]	$\Delta T = T_{TS1} - T_{PT100}$ [°C]
1.	24,4	24,0	-0,4
2.	31,9	31,2	-0,7
3.	40,8	40,0	-0,8
4.	50,2	49,5	-0,7
5.	61,5	60,9	-0,6
6.	70,4	70,1	-0,3
7.	79,9	80,0	0,1
8.	90,0	90,4	0,4

W planie eksperymentu nie zakładano pomiaru temperatury wyższej niż 100°C, dlatego wykorzystano możliwość przeprowadzenia punktowej kalibracji systemu FOTEMP. Po ustabilizowaniu temperatury wody i dokonaniu pomiaru termoparą, skalibrowano układ światłowodowy względem punktu  $T_K = 55,9^\circ\text{C}$ . Wyniki sprawdzenia dokładności po wprowadzeniu kalibracji użytkownika przedstawiono ponownie w postaci wykresu (rys. 4) i tabeli (tab. 2), w której wyróżniono maksymalną odchyłkę określającą dokładność tak przygotowanego toru pomiarowego na  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  (odchyłka pochodząca od układu odniesienia jest pomijalnie mała i nie ma wpływu na wyniki pomiaru).



Rys. 4. Dokładność sondy TS-2 po kalibracji użytkownika względem PT100 $\alpha$   
Fig. 4. TS-2 sensor accuracy, calibrated byt the user in refer to PT100 $\alpha$

Tab. 2. Weryfikacja dokładności sondy TS2 (kalibracja użytkownika)  
Tab. 2. Accuracy of TS2 sensor verification (user's calibration)

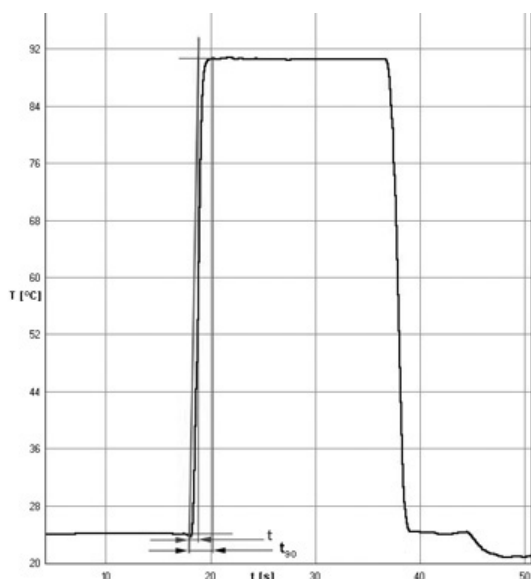
Lp.	$T_{PT100}$ [°C]	$T_{TS1}$ [°C]	$\Delta T = T_{TS1} - T_{PT100}$ [°C]
1.	30,1	30,2	0,1
2.	35,2	35,2	0,0
3.	40,3	40,5	0,2
4.	50,0	50,1	0,1
5.	55,9	55,9	0,0
6.	61,5	61,7	0,2
7.	65,7	65,9	0,2
8.	71,3	71,6	0,3
9.	75,8	76,1	0,3
10.	81,7	81,2	-0,5

## 2. Ocena przydatności w warunkach przemysłowych na drodze eksperymentu

Istnieją dwie podstawowe zalety termometrii światłowodowej, które w wielu aplikacjach z nawiązką rekompensują nie najwyższą dokładność pomiaru. Są to: niska wrażliwość na oddziaływanie pól elektromagnetycznych z otoczenia oraz szybki czas odpowiedzi termometru na wymuszenie. Oczywiście nie można stwierdzić, że światłowód stanowi pewny ekran dla pola elektromagnetycznego. Pisząc o niskiej wrażliwości wskazuje się na poziom, który nie wpływa na przebieg pomiaru. Przeprowadzono dwa eksperymenty, stawiając za tezy występowanie wskazanych powyżej cech termometrów światłowodowych.

### 2.1. Czas odpowiedzi termometru na wymuszenie – eksperyment I

W karcie charakterystyki sondy TS1 wskazano czas odpowiedzi  $t_{90} = 2$  s. Oznacza to, że po 2 s termometr odnotuje wzrost temperatury o 90% zadanej amplitudy. Do pomiaru wykorzystano dwa zbiorniki z wodą o temperaturze 24 i 90°C. Oba naczynia stanowiły element ultratermostatu. Zbieranie danych z sondy TS1 odbywało się z częstotliwością 10 Hz, a czas przeniesienia układu pomiarowego (w powietrzu o temp. 22°C) z naczynia do naczynia wyznaczono na  $1,0 \pm 0,2$  s. Przebieg eksperymentu ilustruje wykres na rys. 4.

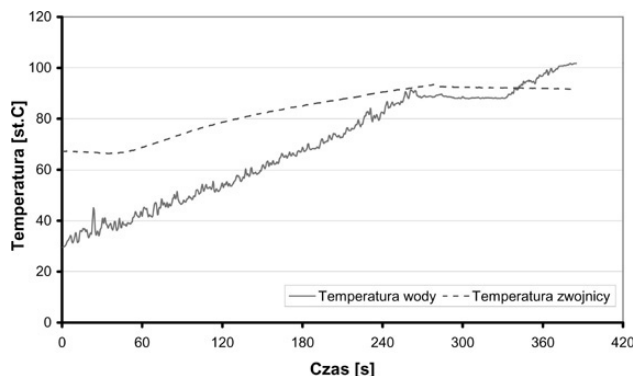


Rys. 5. Wyznaczenie stałej czasowej termometru z sondą TS1  
Fig. 5. Determination of TS1 thermo sensor time constant

Na podstawie wykresu wyznaczono stałą  $t_{90} = 1,8$  s (przy czym przyjęto czas przeniesienia sondy równy 1 s), co jest wartością porównywalną z katalogową, potwierdzającą jednocześnie szybkość odpowiedzi urządzenia na zmianę temperatury.

### 2.2. Pomiar w silnym polu elektromagnetycznym – eksperyment II

Jako źródło pola wykorzystano grzejącą płytę indukcyjną, model PI6400TF. Dokonano pomiaru temperatury wody oraz temperatury zwojnicy, obrazując przebieg na rys. 5.



Rys. 6. Pomiar temperatury w polu elektromagnetycznym  
Fig. 6. Temperature measurement in electromagnetic field

Na potrzeby eksperymentu istotne są dwa punkty wykresu – w okolicy 60 i 300 s. W punktach tych odpowiednio załączono i rozłączono zasilanie pola elektromagnetycznego, spodziewając się skokowej zmiany temperatury jako wpływu pola na układ pomiarowy. Potwierdzono jednak tezę o niskiej wrażliwości systemu na zakłócenia tego typu – w przeciwieństwie do termopary w ferromagnetycznej obudowie element termoczuły w światłowodzie nie nagrzewa się indukcyjnie.

### 2.3. Przegląd aplikacji termometrii światłowodowej

Opisana metoda pomiaru znajduje zastosowanie w miejscach, w których korzysta się z wskazanych zalet oraz w takich, gdzie inna transmisja sygnału nie jest dopuszczalna. Przykładem jest przemysł elektro-energetyczny, w którym pomiar utrudnia przebieg prądu o wysokim napięciu. Te same systemy wprowadzono w przemyśle elektronicznym z racji małej pojemności cieplnej sond. Z tej samej zalety korzysta przemysł zbrojeniowy testując urządzenia EED (ang. *Electroexplosive Device*). W medycynie docenia się małe wymiary sondy, pozwalające wprowadzić ją do ciała pacjenta bez szkody oraz możliwość korzystania z urządzeń podczas rezonansu magnetycznego. W przemyśle papierniczym dokonuje się pomiaru temperatury suszenia drewna impulsami elektrycznymi, a przemysł chemiczny nadzoruje przebieg reakcji [5, 9].

## 3. Wnioski

Termometria światłowodowa nie jest dziś powszechnie stosowana, choć wykazano dobrą dokładność pomiaru, małą wrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne i szybki czas odpowiedzi układu pomiarowego. Dużą zaletą są też wymiary sondy – w stosowanym modelu średnica zewnętrzna nie przekraczała 2 mm – umożliwiające jej instalację w trudno dostępnych miejscach.

Najbliższym punktem termometrów tego typu jest delikatna konstrukcja. Kierunek prac nad tym zagadnieniem wyznacza już wprowadzona osłona PTFE. Drugim ważnym aspektem jest dokładność pomiaru i związane z nią tłumienie sygnału w światło-

wodzie. Metodą poprawy dokładności oraz minimalizacji poziomu wygaszania fali jest odpowiednie ułożenie światłowodu oraz podnoszenie jego jakości poprzez ograniczanie niejednorodności w konstrukcji.

W przyszłości układy pomiarowe tego typu powinno się stosować w energetyce – do ciągłej analizy rozkładu temperatury w sieciach wysokonapięciowych, co dziś jest nadal rzadkością – oraz w badaniach oceanograficznych – do pomiaru temperatury na dnie oceanów. Oba te zagadnienia nawiązują do czujników z wymuszonym rozpraszaniem.

#### 4. Literatura

- [1] Szczot F. i inni: Pomiar temperatury za pomocą mikrozgięciowego czujnika temperatury, *Elektronizacja* 7'96, s. 17-20.
- [2] Pustelny T.: Zjawisko luminescencji i jego zastosowanie w sensorach światłowodowych, *Elektronizacja* 4'96, s. 27-30.
- [3] Sang Min J., Yong Pyung K.: Temperature measurements using fiber optic polarization interferometer, *Optics & Laser Technology*, nr 36, s. 181 – 185.
- [4] Xiaoyi DONG, Hao ZHANG, Bo LIU, Yinping MIAO, Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications, *Photonic Sensors*, nr 1, s. 6 – 30.
- [5] G. F. Gornostaev, G. A. Frolov, V. V. Pasichnyi, and G. V. Tkachenko: Fiber-optic thermometry and its application, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, nr 2, s. 403-408.
- [6] Kaczmarek Z.: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006.
- [7] Szustakowski M.: Elementy techniki światłowodowej, WNT, Warszawa 1992.
- [8] Hypszer R., Pluciński J.: Światłowodowy czujnik temperatury wykorzystujący interferometr Fabry'ego-Perota, Materiały konferencji „V Konferencja Światłowody i ich zastosowanie”, 22-24 stycznia 1998 r., Białowieża (Polska), s. 301-309.
- [9] Cai Y.C., Hayashi K.: Pressure and temperature distribution in wood during radio-frequency/vacuum drying, Materiały konferencji „7th International IUFRO Wood Drying Conference”, 9-13 czerwca 2001 r., Tsukuba (Japonia), s. 386-391.

otrzymano / received: 10.10.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2011

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl). Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przesyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl) lub pocztą zwykłą, na adres:

Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola,  
Sekretarz Redakcji mgr Agnieszka Skórkowska,  
ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.