

**Krzysztof DUZINKIEWICZ**URZĄD KOMUNIKACJI ELEKTRONICZNEJ, DELEGATURA W ZIELONEJ GÓRZE,  
ul. Dąbrowskiego 41b, 65-021 Zielona Góra**Analiza metod pomiarów zaburzeń przewodzonych EMC z wykorzystaniem pakietu Mathematica**

Mgr Krzysztof DUZINKIEWICZ



Absolwent Wydziału Matematyki, Informatyki i Ekonomometrii Uniwersytetu Zielonogórskiego. Pracownik Urzędu Komunikacji Elektronicznej Delegatury w Zielonej Górze, pełniący obowiązki Naczelnika Wydziału Kontroli Radiowej i Zwalczania Zakłóceń. Wieloletni pracownik Laboratorium Badań Technicznych, realizujący statutowe zadania Urzędu z zakresu Kontroli Rynku Wyrobów, prowadzący badania w obszarze kompatybilności elektromagnetycznej.

e-mail: k.duzinkiewicz@uke.gov.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono pozanormatywne metody pomiarów zaburzeń przewodzonych EMC na przykładzie zasilacza impulsowego AC/DC. Wykonano analizę porównawczą znormalizowanych pomiarów kompatybilności elektromagnetycznej zaburzeń przewodzonych wykonywanych specjalizowanym odbiornikiem pomiarowym EMC z badaniami pozanormatywnymi wykonanymi w dziedzinie czasu za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Do obliczeń numerycznych i wizualizacji wyników pomiarów wykorzystano pakiet Wolfram Mathematica 8. Przeprowadzona analiza wykazała porównywalne wyniki pomiarów obu metod.

**Słowa kluczowe:** pomiary w dziedzinie czasu i częstotliwości, EMC, zaburzenia przewodzone, transformata Fouriera, okno czasowe.

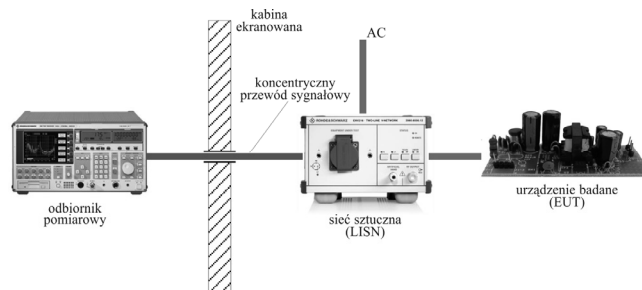
**Analysis of EMC measuring methods for conducted interference with use of Mathematica package****Abstract**

This paper presents the comparative analysis of measurements of conducted interferences taken with an EMI test receiver [5] (Fig. 1) according to norm [4] (PN-EN 55014) and non-normative measurements made by means of a digital oscilloscope (Fig. 2) in time domain. The investigations were carried out on an AC/DC supplying converter, commonly used in a low power chip TNY266 [6] (Fig. 4). Section 2 describes the measurement tests performed with the digital oscilloscope. Section 3 presents analytical transformations of signals from the time domain (Fig. 5) into the frequency domain (Fig. 6). Section 4 deals with a mathematical model of transforming [8] the sinusoidal signal with a third harmonic (Fig. 7) to the form of the frequency spectrum by means of a time window (Fig. 9). Use of time windows in real signal transformations is shown in Section 5 (Fig. 10). The signal frequency spectrum in electromagnetic compatibility research [1, 2] determines one of the most important ways of describing the level of disturbances emitted by electric and electronic equipment. Therefore the analysis results are shown on the same diagram (Fig. 11) in the frequency domain: the signal frequency spectrum of interferences measured with the EMI test receiver as well as the signal frequency spectrum obtained analytically. Numerical calculations and visualization of the measurement results were made with Wolfram Mathematic 8 packet. The analysis results show that there are slight differences between those two methods.

**Keywords:** measurements in time and frequency domain, EMC, conducted interferences, Fourier transform, time window.

**1. Wprowadzenie**

Dyrektywa EMC [1, 2] oraz normy zharmonizowane z dyrektywą ściśle określają konfigurację stanowiska pomiarowego, parametry sprzętu pomiarowego oraz sposób prowadzenia samych pomiarów i interpretacji wyników [3]. Pomiar zaburzeń przewodzonych wykonywany jest w kabinie ekranowanej za pomocą sztucznej sieci o stałej impedancji 50Ω i mierzony jest za pomocą specjalizowanego odbiornika pomiarowego EMC (rys. 1). Otrzymane wyniki pomiarów przedstawione są w dziedzinie częstotliwości.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe badań zaburzeń przewodzonych w dziedzinie częstotliwości

Fig. 1. Test measurement of conducted interferences in frequency domain

Przeprowadzone pozanormatywne badania eksperymentalne wykonane są również za pomocą sztucznej sieci w kabinie ekranowanej. Same pomiary wykonane są natomiast w dziedzinie czasu za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Stosując transformatę Fouriera, pomiar przekształcany jest do postaci widma częstotliwości sygnału.

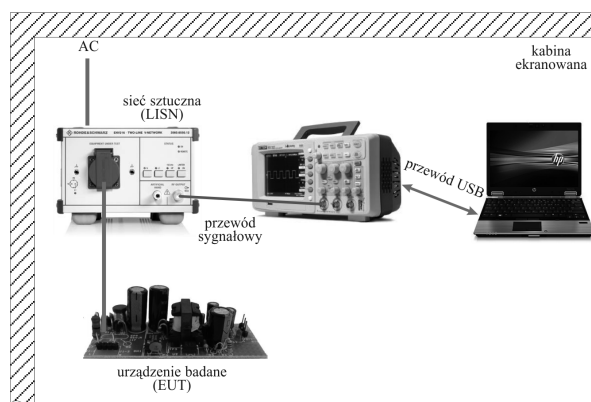
Badania pozanormatywne i zgodne z normą przedmiotową dla typu badanej grupy urządzeń [4] (PN-EN 55014) wykonane zostały dla tego samego zasilacza impulsowego AC/DC. Pozwoliło to na zachowanie identycznego środowiska pomiarowego dla różnych sposobów pomiarów: odbiornikiem pomiarowym i oscyloskopem cyfrowym.

Do realizacji badań pomiarowych oraz obliczeń numerycznych wykorzystano środowisko Mathematica 8, w którym zostały zrealizowane:

- model matematyczny sygnału sinusoidalnego z pierwszą harmoniczną,
- model matematyczny splotu okna czasowego i sygnału,
- transformata Fouriera sygnału ograniczonego oknem czasowym,
- realizacja założeń modelu matematycznego do przekształceń badanego sygnału rzeczywistego na wyjściu oscyloskopu cyfrowego,
- opracowanie i wizualizacja wyników pomiarów.

**2. Pomiary w dziedzinie czasu**

Konfiguracja stanowiska dla pomiarów w dziedzinie czasu przedstawia rysunek 2.

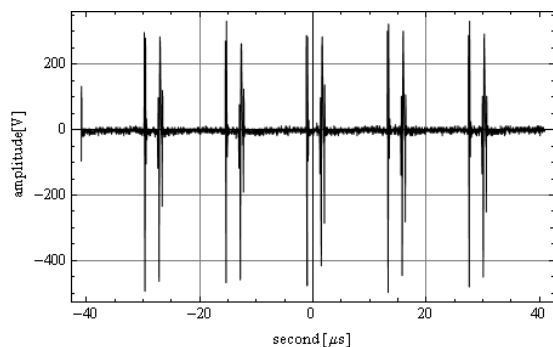
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe badań zaburzeń przewodzonych w dziedzinie czasu  
Fig. 2. Measuring stand for investigations of conducted interferences in the time domain

Zasilacz impulsowy przyłączony jest do sieci energetycznej przez sieć sztuczną (LISN). W badaniach wykorzystano jednofazową sieć typu V firmy Rohde&Schwarz ENV216 [5] oraz oscyloskop cyfrowy firmy ATTEN ADS1000.

Wyjście sygnału RF sztucznej sieci połączone jest bezpośrednio z kanałem oscyloskopu za pomocą kabla koncentrycznego.

Dane pomiarowe z oscyloskopu są przesyłane do komputera za pomocą interfejsu USB i bezpośrednio zapisywane w formacie plikowym „.csv”. Następnie wyniki pomiarowe są przetwarzane przez skrypt w środowisku Mathematica i przedstawiane graficznie w postaci diagramów oscylacyjnych odzwierciedlających pomiar na ekranie oscyloskopu.

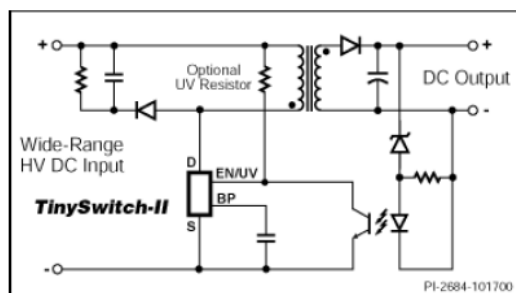
Rysunek 3 przedstawia oscylogram przebiegu czasowego klucza w przekształtniku AC/DC opracowany na podstawie przesłanych danych pomiarowych.



Rys. 3. Charakterystyka w dziedzinie czasu klucza przekształtnika AC/DC  
Fig. 3. Pulse AC/DC power supply signal in the time domain

Badania przeprowadzono na przekształtniku AC/DC opartym na powszechnie stosowanym w zasilaczach impulsowych małej mocy kluczu TNY266 [6] (z rodziny TinySwitch II). Na rysunku 4 pokazano ogólny schemat zastosowania układu. Częstotliwość pracy, przełączania tranzystora kluczującego wynosi 132kHz. Częstotliwość pracy elementu przełączającego - szybkie czasy przełączania (zbocza narastające) są główną przyczyną powstawania zaburzeń [7].

Przebiegi czasowe mierzone oscyloskopem cyfrowym za pomocą sondy napięciowej (z linowym pasmem pomiarowym do 60MHz) na elemencie przełączającym (tranzystorze kluczującym) oraz sygnał na wyjściu RF sieci sztucznej zmierzony bezpośrednio są co do kształtu porównywalne, co wskazuje na główne źródło emisji zaburzeń przewodzonych propagujących w kierunku sieci zasilającej.

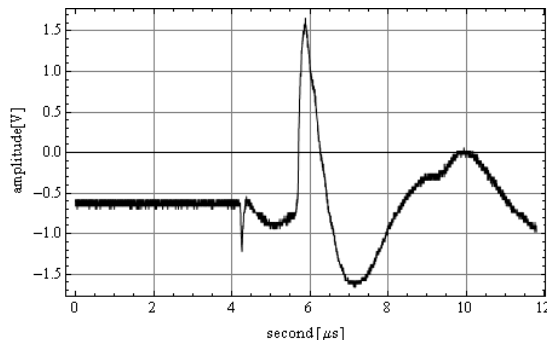


Rys. 4. Ogólny schemat zasilacza impulsowego opartego na układzie TNY266  
Fig. 4. General view of the pulse power supply supported based on chip TNY266

### 3. Analiza w dziedzinie częstotliwości

Badany przebieg czasowy (rys. 5) po przesłaniu do komputera został poddany za pomocą transformaty Fouriera [8], przekształceniu do postaci widma częstotliwości sygnału.

Ponieważ otrzymany sygnał wyjściowy dostajemy z oscyloskopu cyfrowego w postaci skończonej liczby punktów, gdzie odpowiednim wartościom napięcia odpowiadają kolejne wartości czasowe, to naturalnym było zastosowanie dyskretnej transformacji Fouriera (DFT) na zbiorze liczb rzeczywistych.



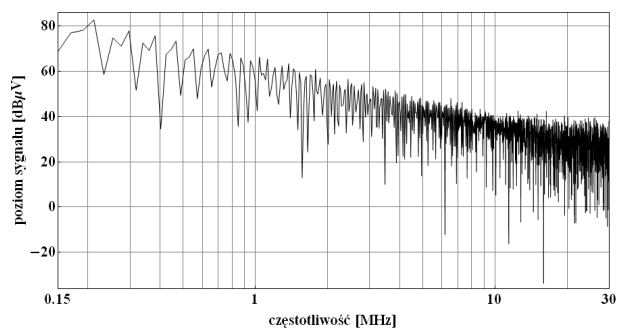
Rys. 5. Sygnał w dziedzinie czasu  
Fig. 5. Signal in the time domain

Najlepsze odwzorowanie, najbardziej zbliżone w stosunku do pomiarów odbiornikiem zaburzeń EMC ma zastosowanie dyskretnej transformacji cosinusowej [8] (ang. *discrete cosine transform*), a właściwie zmodyfikowana wersja (1) wzoru podstawowego - wersja II (DCT-II).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos \left[ \frac{\pi}{N} \left( n + \frac{1}{2} \right) k \right], \quad k=0, \dots, N-1 \quad (1)$$

Korzystając ze zdefiniowanej funkcji *FourierDCT* modułu *IntegralTransforms* (2) pakietu Mathematica otrzymujemy graficzną reprezentację widma częstotliwości sygnału przedstawionego na rysunku 6.

$$\text{FourierDCT}[\text{list}, m], \quad m=1, \dots, IV \quad (2)$$



Rys. 6. Widmo częstotliwości sygnału po transformacji (DCT-II)  
Fig. 6. The signal frequency spectrum after transformation (DCT-II)

Ponieważ norma przedmiotowa dla typu badanej grupy urządzeń, w naszym przypadku przekształtników AC/DC, ściśle określa pasmo pomiarowe - charakterystyka widma częstotliwości (rys. 6) sygnału została ograniczona (obcięta) do pasma od 150kHz do 30 MHz (CISPR B) [9], pasma zaburzeń przewodzonych. Natomiast poziom sygnału został przeskalowany do skali decybelowej (3).

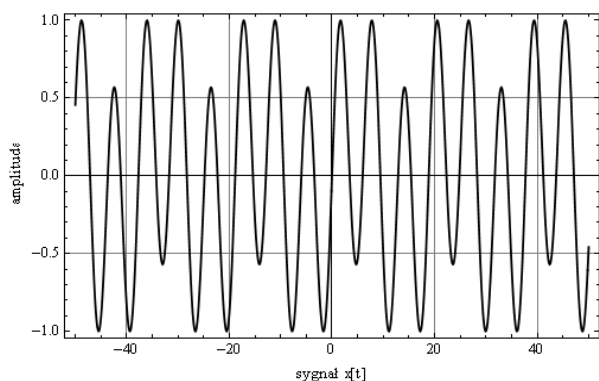
$$U_{dB} = 20 \log(U) \quad (3)$$

Uzyskana charakterystyka otrzymana analitycznie powinna pokrywać się z wynikami pomiarowymi uzyskanymi za pomocą odbiornika pomiarowego EMC.

#### 4. Model matematyczny transformacji sygnału do postaci widma częstotliwościowego

Analizując widmo sygnału, przekształcając sygnał analogowy za pomocą dyskretnej transformacji Fouriera w postać widmową dochodzi do przecieku – pojawiające się sygnały (częstotliwości) pośrednie rozmywane są do sąsiednich prążków widma.

Na przykładzie symulacji analogowego sygnału sinusoidalnego z trzecią harmoniczną (rys. 7) pokazano zastosowanie okna czasowego krzywej Gaussa (4).



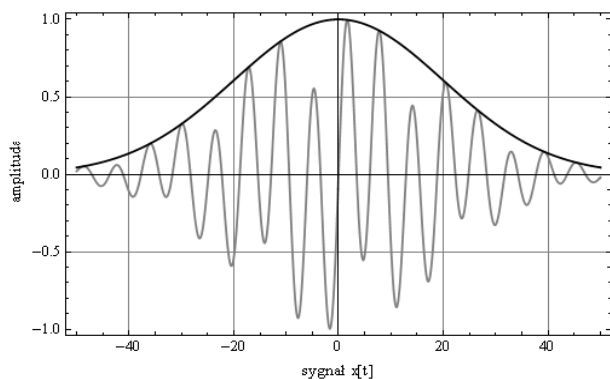
Rys. 7. Sygnał sinusoidalny z 3 harmoniczną  
Fig. 7. Sinusoidal signal with the third harmonic

$$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\delta}} e^{-\frac{x^2}{4\delta}} \quad (4)$$

Parametr  $\delta$  wzoru (4) krzywej Gaussa określa nachylenie ramion, pozwala to na pewne manipulowanie kształtem okna, poprawia dynamikę.

Metoda ta polega na wykonaniu operacji splotu sygnału analizowanego z sygnałem okna w osi czasu. W wyniku tej operacji zmienia się amplituda sygnału w funkcji okna, tłumione są niepożądane składowe, będące efektem przecieku.

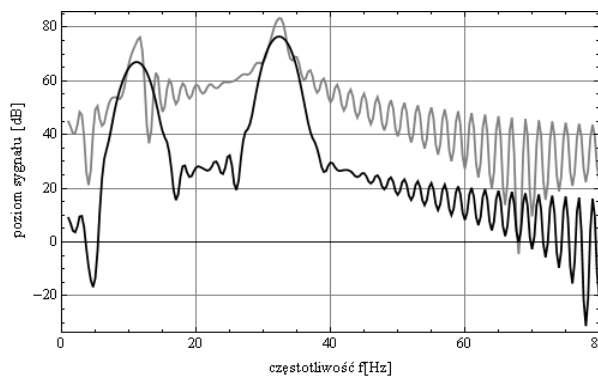
W wyniku tej operacji przykładowy sygnał sinusoidalny (rys. 7) zostaje pomnożony przez funkcję okna. Wynik splotu sygnału z oknem czasowym został przedstawiony na rysunku 8.



Rys. 8. Okno czasowe Gaussa  
Fig. 8. The Gaussian time window

Dalej stosując transformatę Fouriera (1) do tak otrzymanego sygnału uzyskujemy reprezentację widmową, reprezentację w dziedzinie częstotliwości.

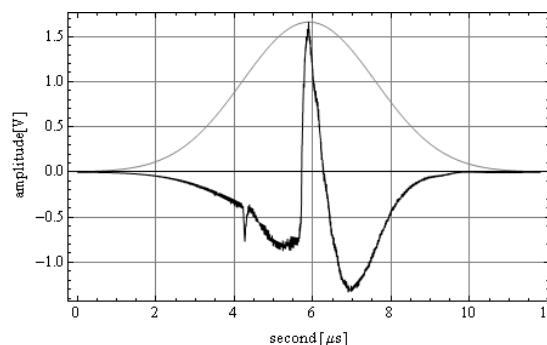
Rysunek 9 przedstawia widmo sygnału bez okna czasowego - dolny wykres oraz widmo sygnału z oknem czasowym - wykres górny.



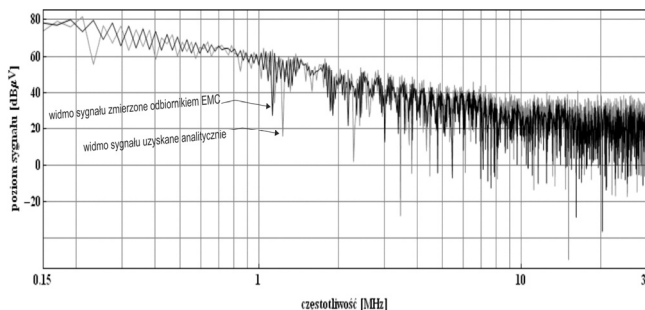
Rys. 9. Reprezentacja widmowa sygnałów  
Fig. 9. Spectrum signal representation

#### 5. Widmo sygnału rzeczywistego ograniczonego oknem czasowym

Stosując metodę okien czasowych przedstawionych w rozdziale poprzednim na przykładzie modelu sygnału analogowego z pierwszą harmoniczną oraz stosując transformatę Fouriera do badanego sygnału rzeczywistego (rys. 10) zmierzony ze wyjścia RF sieci sztucznej za pomocą oscyloskopu cyfrowego, otrzymujemy widmo sygnału przedstawione na rysunku 11. Oczywiście charakterystyki częstotliwościowe wydma zostały obcięte do zakresu pasma CISPR B [9].



Rys. 10. Sygnał w dziedzinie czasu przeskalowany oknem gaussowskim  
Fig. 10. Signal in the time domain scaled with the Gaussian window



Rys. 11. Widmo częstotliwościowe sygnału zmierzone odbiornikiem EMC oraz uzyskane analitycznie  
Fig. 11. The signal frequency spectrum measured with the EMI test receiver and the signal frequency spectrum obtained analytically

Analizę na sygnale rzeczywistym przeprowadzono dobierając eksperymentalnie kształt okna czasowego dla kilku różnych funkcji, okien czasowych: trójkątnego, Holmana, Blackmana oraz Gaussa.

Najlepsze przybliżenie porównane do pomiarów wykonanych odbiornikiem EMC uzyskano stosując okno czasowe typu Gaussa. Kształt widm sygnałów w obu metodach pomiarowych jest porównywalny (rys. 11).

## 6. Podsumowanie

Metody pomiaru zaburzeń przewodzonych przy użyciu odbiornika pomiarowego są jednymi z podstawowych badań określonych przez dokumenty normalizacyjne. Zaproponowana metoda pomiarowa zaburzeń przewodzonych z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego oraz zastosowany aparat matematyczny do przekształceń sygnału do postaci widma częstotliwościowego pokazuje, że pozanormalne podejście pomiarowe doprowadza do porównywalnych wyników. Oczywiście stosując w pomiarach zaburzeń specjalizowany odbiornik pomiarowy EMC dysponujemy stanowiskiem pomiarowym, w którym pomiary dokonujemy automatycznie, uzyskujemy wprost widmo częstotliwościowe zaburzeń.

Nieznaczne różnice pomiędzy widmem sygnału uzyskanego wprost przy pomiarze odbiornikiem EMC a widmem uzyskanym analitycznie wynikają głównie z szerokości pasma pomiarowego oscyloskopu cyfrowego oraz pasma sondy pomiarowej. Badania eksperymentalne pokazały, że pasmo pomiarowe sondy i oscyloskopu cyfrowego powinno być przynajmniej dwukrotnie większe od zakresu badań zaburzeń przewodzonych – w tym wypadku na co najmniej 60MHz oraz charakterystyka samej sondy pomiaro-

wej powinna być liniowa w całym zakresie, widać to w szczególności dla częstotliwości poniżej 1MHz.

## 7. Literatura

- [1] Dyrektywa Kompatybilność elektromagnetyczna. 2004/108/WE.
- [2] Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o kompatybilności elektromagnetycznej (Dz. U. z 2007 r. Nr 82, poz. 556).
- [3] Ustawa z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz. U. z 2010 r., Nr 138, poz. 935, tekst jednolity).
- [4] PN-EN 55014-1: 2004, Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń. Część 1: Emisja.
- [5] Rohde & Schwarz GmbH: EMI test receiver 9kHz to 2750MHz ESCS 30. Operating manual, 1998.
- [6] <http://www.powerint.com>
- [7] Sroka J.: Niepewność pomiarowa w badaniach EMC. Pomiary emisyjności radioelektrycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
- [8] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów. WKiŁ, 2007.
- [9] PN-CISPR 16-1: 1997, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Wymagania dotyczące urządzeń i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne. Urządzenia do pomiarów zaburzeń radioelektrycznych odporności na zaburzenia radioelektryczne.

otrzymano / received: 04.06.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2012

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.

Redakcja

### Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK

ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: 22 827 25 40

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