

Anna PIASKOWY, Ryszard BOGACZ

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

Bezprzewodowy system monitorowania rozkładu temperatur pomieszczeń

Mgr inż. Anna PIASKOWY

Absolwentka Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach – specjalność Energoelektronika (2006). Zajmuje się komputerowymi systemami pomiarowymi i pomiarami dokładnymi.



e-mail: anna.piaskowy@polsl.pl

Mgr inż. Ryszard BOGACZ

Wykładowca na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od 1995 roku pracuje w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki. Działalność dydaktyczna obejmuje głównie technikę cyfrową i mikroprocesorową, uruchamianie oraz programowanie układów mikroprocesorowych, a naukowo-badawcza zagadnienia związane z czujnikami gazów i ich użyciem w systemach pomiarowych.



e-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl

Streszczenie

Praca zawiera opis systemu do pomiaru i rejestracji skuteczności ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń. System zbudowany jest z bezprzewodowych przetworników temperatury i rejestratora. Podstawowym problemem postawionym przy niniejszej pracy jest równoczesna obsługa wielu bezprzewodowych przetworników temperatury. Program obsługujący system pomiarowy umożliwia akwizycję i wizualizację rozkładu temperatur w pomieszczeniu z wykorzystaniem Internetu. Możliwa jest obserwacja i kontrola bieżącej temperatury w trybie „online”. W przetwornikach temperatury wykorzystywane są czujniki Pt100 połączone z układem mostkowym TYBO realizującym pomiar rezystancji czujnika. Pomiar rezystancji zastępowany jest cyfrowym pomiarem czasu co w rezultacie daje dogodną do przetwarzania postać otrzymywanych wyników pomiaru temperatury. Dużą zaletą prezentowanego systemu jest jego dokładność w działaniu przy niewielkich kosztach konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: transmisja bezprzewodowa, pomiar temperatury, mostek równoważony ładunkowo.

Wireless monitoring system of temperature distribution in the room

Abstract

In this paper a measuring system of the warm up and the cool down efficiency is presented. It consists of the wireless temperature transducers and the logger. The basic problem was to figure out simultaneously service for the large amount of the sensors. Program which services the measuring system enables the acquisition and the visualization of temperature distribution in the room by means of Internet. System enables monitoring and gives control of current temperature online. Temperature transducers are built of the Pt100 sensors and TYBO bridge, which realize precise resistance measurement. Measurement of resistance is performed indirectly by the digital measurement of time. Measurement accuracy and low construction costs are big advantages of presented system.

Keywords: wireless transmission, temperature measurement, charge balanced bridge.

1. Wstęp

W ostatnich latach można było zaobserwować wzrost zapotrzebowania na rozproszone bezprzewodowe systemy pomiarowe. Główną zaletą bezprzewodowych systemów pomiarowych jest brak okablowania, a co za tym idzie tańsze koszty. Przykładem wykorzystania tych systemów może być kontrola temperatur wymagana przez system HACCP (ang. Hazard Analysis and Critical Control Point), który w Polsce obowiązuje od 2004 roku i ma na celu zapewnienie jakości produktów spożywczych przeznaczonych dla konsumentów. Z myślą o usprawnieniu procesu kontroli temperatur z kilku miejsc i w określonych przedziałach czasu zaprojektowano bezprzewodowy system pomiaru i rejestracji temperatury z wielu przetworników. Daje on możliwość archiwizacji i wizualizacji wyników w komputerze PC dodatkowo z opcją tworzenia raportów kontrolnych. Zaprojektowany system zbudowany jest z bezprzewodowych przetworników pomiarowych

i rejestratora. Przetworniki temperatury wymieniają dane z rejestratorem wykorzystując pasmo radiowe.

2. Bezprzewodowa transmisja danych

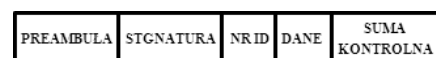
Transmisja bezprzewodowa zrealizowana jest w oparciu o transceivery CC1000 firmy Texas Instruments [1]. Programowa obsługa układu polega na odpowiednim zapisaniu rejestrów sterujących pracą układu. Wpisów do rejestrów dokonuje się ściśle według przyjętych reguł komunikacji układu z mikrokontrolerem. Układ daje możliwość wyboru kanału transmisji, odpowiedniego sposobu kodowania jak i możliwość regulacji zasięgu poprzez programowe ustawianie mocy sygnału.

Opisany system wykorzystuje topologię typu gwiazdy, czyli jedno urządzenie rozgłaszające - rejestrator i wiele odbiorników - przetworników temperatury. Rejestrator wysyła do wszystkich przetworników temperatury sygnał zezwalający na rozpoczęcie pomiaru tzw „pytanie”. Jego zadaniem jest odbiór wyników pomiaru od poszczególnych czujników, ich akwizycja i wizualizacja. Rejestrator to układ transceivera CC1000 połączony z komputerem PC poprzez łącze USB [2]. Wymiana danych między przetwornikami pomiarowymi a rejestratorem odbywa się według ściśle określonych reguł ujętych w protokole transmisji danych.

2.1. Protokół transmisji

Problem postawiony w niniejszej pracy dotyczy utworzenia optymalnego protokołu transmisji, obsługującego wiele przetworników oraz umożliwiającego korektę pojawiających się przekłamań transmisji.

Komunikacja między urządzeniami systemu opiera się na wzajemnej synchronizacji przetworników. Rejestrator pracujący początkowo jako nadajnik wysyła „pytanie” do wszystkich przetworników pomiarowych. Przetworniki rozpoczynają pomiar – sprawdzenie bieżącej temperatury, następnie w określonych szczełach czasowych odsyłają wynik pomiaru w pakiecie danych jak rys. 1.



Rys. 1. Ramka danych
Fig. 1. Data frame

Każdy przetwornik przez dłuższy czas znajduje się w trybie obniżonego poboru mocy, w ten sposób zapewnione jest małe zużycie baterii, z których przetwornik jest zasilany. W określonej szczełinie czasowej przeznaczonej na odbiór „pytania” wysłanego przez rejestrator, wszystkie przetworniki równocześnie rozpoczynają pomiar temperatury. Po ukończeniu pomiaru pierwszy przetwornik przechodzi w tryb nadawania i wysyła wynik do rejestratora, reszta przetworników przechodzi w tryb obniżonego poboru mocy i czeka na swoją szczełinę czasową, aby wysłać

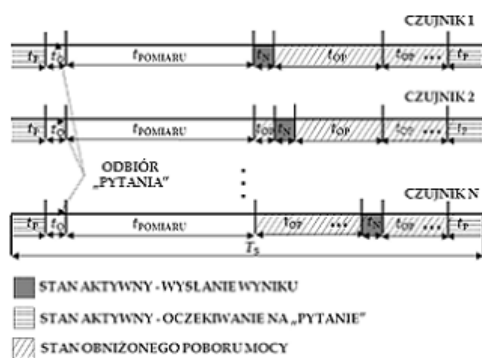
wynik pomiaru. Po wysłaniu wyniku każdy przetwornik przechodzi w tryb obniżonego poboru mocy i zostaje „obudzony” dopiero gdy rejestrator ma transmitować kolejne „pytanie”. Odstęp czasu T_S pomiędzy którym transmitowane są kolejne „pytania” przez rejestrator decyduje o intensywności z jaką otrzymywane są kolejne wyniki pomiarów z przetworników. Każdy przetwornik potrzebuje ok. 0,6s na odbiór pytania, przeprowadzenie pomiaru, przejście w tryb nadawania i odesłanie wyniku pomiaru. Odstępy pomiędzy poszczególnymi szczelinami czasowymi przedstawione są na rys. 2.

W zaprojektowanym systemie odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi pomiarami nie mogą być mniejsze niż T_S . Czas całego cyklu transmisji wyników pomiarów z przetworników można szacować według zależności:

$$T_S \geq t_p + t_o + t_{\text{POMIARU}} + N t_N, \quad (1)$$

gdzie:

- t_p – szczelina czasowa, w której przetwornik czeka na „pytanie”,
- t_o – czas odbioru „pytania”,
- t_{POMIARU} – czas pomiaru,
- t_N – czas wysłania pakietu danych z wynikiem pomiaru,
- N – liczba przetworników temperatury



Rys. 2. Zależności czasowe dla zbioru przetworników pomiarowych
Fig. 2. Timing diagram

W każdym stanie aktywnym przetwornika czas pomiaru jest najdłuższy w odniesieniu do pozostałych operacji. Czas pomiaru zależy w dużej mierze od rozdzielczości zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego. Dość istotnym wnioskiem powyższych rozważań jest zależność dokładności pomiaru od szybkości działania systemu. Chcąc uzyskać określoną dokładność pomiaru konieczne jest zwiększenie czasu pomiaru co ma swoje negatywne odzwierciedlenie w szybkości działania systemu, a konkretniej zmniejszeniu intensywności akwizycji wyników przy założeniu stałej liczby przetworników.

2.2. Algorytm programu

Ponieważ przetworniki pomiarowe zasilane są bateryjnie należało zadbać o jak najmniejszy pobór mocy układu. W fazie projektowania dobrano elementy o niskim poborze energii, natomiast podczas tworzenia oprogramowania zadbano, aby układ pozostawał w stanie obniżonego poboru mocy przez maksymalnie długi okres czasu. W stan obniżonego poboru mocy wprowadzany jest mikrokontroler i transceiver CC1000 natomiast część analogowa układu zostaje odłączona od zasilania.

Pomiar temperatury zrealizowany jest na przerzaniach mikrokontrolera, jego działanie opisane jest szerzej w literaturze [3]. W co drugim przerzaniu, gdy sygnał na wejściu komparatora ma potencjał wyższy od 1,23V mikrokontroler wysła sygnał załączający klucz analogowy. Powoduje to zmianę polaryzacji prądu w obwodzie i kondensator integratora zaczyna się ładować,

a liczba zliczeń załączeń klucza Z wzrasta. Przerwania powtarzane są co określony czas T_Z . W kolejnym przerzaniu klucz jest wyłączony, a kondensator rozładowuje się, po czym następuje kolejne przerwanie aż do liczby odpowiadającej rozdzielczości przetwarzania analogowo cyfrowego. Dodatkowo program został zaopatrzone w algorytm do korekcji błędów wynikającego z niepełnego cyklu zliczeń załączeń klucza Z w całym okresie zliczania T_S . Idea algorytmu polega na obserwacji w całym okresie zliczania poszczególnych cykli ładowania i rozładowywania kondensatora i dopełnieniu ostatniego cyklu. Następnym krokiem jest uwzględnienie w obliczeniach odpowiednio zmodyfikowanej liczby okresów kluczowania.

3. Pomiar temperatury

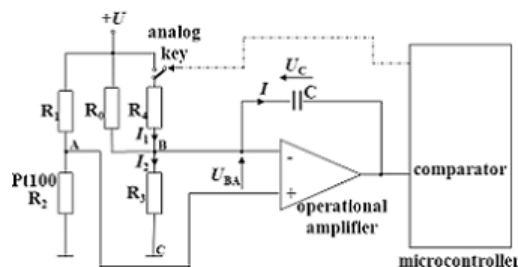
Pomiar temperatury opiera się na wykorzystaniu platynowego termorezystora Pt100 oraz mostka TYBO [2]. W termorezystorze Pt100 wykorzystywana jest zależność rezystancji od temperatury. Platynowy termorezystor Pt100 w zakresie temperatur od 00C do +8500C wykazuje zależność rezystancji od temperatury przybliżoną wielomianem drugiego stopnia.

$$R = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2), \quad (2)$$

gdzie:

- R_0 – rezystancja elementu w temperaturze 0⁰C
- α, β – temperaturowe współczynniki zmian rezystancji

Jako przetwornik zamieniający rezystancję na wartość cyfrową został wykorzystany mostek TYBO. W jednej gałęzi mostka (rys 3), został umieszczony termorezystor Pt100. Mostek jest zasilany ze źródła napięcia stałego. Analizę układu przeprowadzono przy założeniu, że wzmacniacz operacyjny i klucz analogowy są idealne.



Rys. 3. Schemat ogólny układu przetwornika temperatury
Fig. 3. General scheme of the measuring circuit temperature transducer

Działanie układu polega na cyklicznym załączaniu i wyłączaniu jednej gałęzi mostka, tak aby w przekątnej mostka napięcie było zerowe. Podczas przełączania zmienia się wartość rezystancji w kluczowanej gałęzi. Jeśli klucz jest zamknięty to prąd płynący przez kondensator znajdujący się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego powoduje jego ładowanie. Gdy klucz jest otwarty zmienia się polaryzacja płynącego prądu i kondensator się rozładowuje. Z tego wynika, że kondensator gromadzi lub przekazuje ładunek proporcjonalny do czasu i wartości płynącego prądu, a zatem wzmacniacz operacyjny wraz z kondensatorem pełni rolę źródła prądowego i magazynu ładunku oddawanego lub pobieranego z układu. Całkowity ładunek dopływający do kondensatora w okresie pomiaru jest równy 0.

$$Q_Z + Q_R = 0, \quad (3)$$

gdzie:

- Q_Z – ładunek dopływający do kondensatora podczas ładowania,
- Q_R – ładunek odpływający z kondensatora podczas rozładowywania.

Załączanie i wyłączenie klucza sterowane jest przez mikrokontroler tak, że klucz załączany jest na określony czas t_z . Całkowity okres obserwacji kluczkowania T składa się z poszczególnych faz, w których kondensator jest ładowany T_Z i rozładowywany T_O .

$$T = T_Z + T_O. \quad (4)$$

Czas ten jest także krotnością poszczególnych okresów załączeń klucza i pojemności licznika k zliczającego te załączenia:

$$T = 2t_z k. \quad (5)$$

Całkowity czas, w którym klucz jest otwarty, a kondensator rozładowuje się można obliczyć z zależności (4) i (5):

$$T_O = (2k - Z)t_z, \quad (6)$$

gdzie:

Z – ilość załączeń klucza w okresie pomiaru T

W czasie T_O z kondensatora odpływa ładunek:

$$Q_R = T_O I_R, \quad (7)$$

gdzie:

$$I_R = \frac{1}{R_0} \frac{R_1 U}{R_1 + R_2} - \frac{1}{R_3} \frac{R_2 U}{R_1 + R_2}. \quad (8)$$

Ładunek gromadzony w kondensatorze w czasie T_Z ma wartość:

$$Q_Z = Z t_z I_L, \quad (9)$$

gdzie:

$$I_L = \frac{R_4 + R_0}{R_4 R_0} \frac{R_1 U}{R_1 + R_2} - \frac{1}{R_3} \frac{R_2 U}{R_1 + R_2}. \quad (10)$$

Korzystając z zależności (3) oraz wstawiając powyższe równania można wyznaczyć całkowitą ilość załączeń klucza Z :

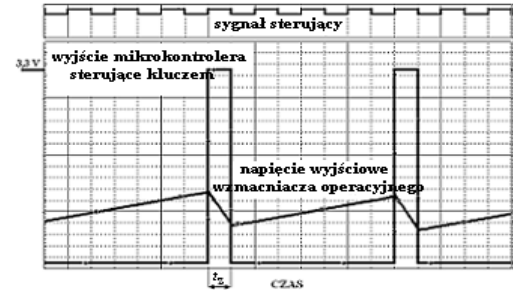
$$Z = 2k \left(\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} - \frac{R_4}{R_0} \right). \quad (11)$$

Stosunek ilości załączeń klucza Z do czasu T odpowiadającego całkowitej liczbie zliczeń impulsów zegarowych jest wprost proporcjonalny do wartości rezystancji termorezystora Pt100 i w przybliżeniu proporcjonalny do temperatury otoczenia. Znając wartości rezystancji w gałęziach mostka i korzystając z zależności (2), na podstawie zmierzonej liczby załączeń klucza Z w okresie pomiaru T możemy wyliczyć rezystancję termorezystora Pt100 odpowiadającą temperaturze chwilowej ϑ .

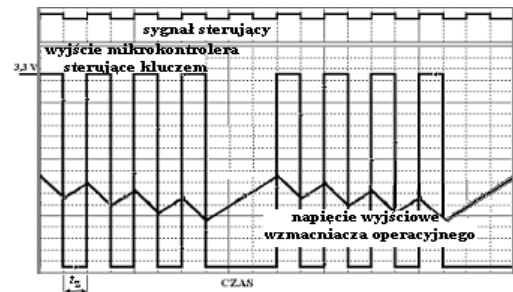
4. Wyniki badań oraz identyfikacja podstawowych źródeł błędów

W początkowej fazie projektowania przeprowadzono symulacje działania układu w PSpice. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

W sytuacji gdy klucz jest otwarty i kondensator rozładowuje się można zauważyć pewną prawidłowość. Im mniejsze odchylenie rezystancji Pt100 od wartości dla 0°C tym proces rozładowywania kondensatora przebiega wolniej (rys. 4) – wynika to z tego, że prąd I_R jest mniejszy. Przy zamkniętym kluczu jest odwrotnie, czyli kondensator tym szybciej się ładuje im rezystancja Pt100 jest bliższa rezystancji R_3 , co tym razem wynika z wartości prądu I_L . Porównując prądy I_R i I_L można wyciągnąć wniosek, że w tych układach prąd I_L będzie zawsze większy od prądu I_R , czyli kondensator się zawsze szybciej ładuje.



Rys. 4. Symulacja działania układu dla temperatury czujnika 25°C w PSpice
Fig. 4. Simulation in PSpice at 25°C



Rys. 5. Symulacja działania układu dla temperatury czujnika 100°C w PSpice
Fig. 5. Simulation in PSpice at 100°C

W przeprowadzonych rozważaniach teoretycznych uwzględnione były elementy idealne, tak więc można stosunkowo łatwo przewidzieć potencjalne źródła błędów spowodowane napięciem niezerównoważenia zastosowanego wzmacniacza operacyjnego, dodatkowej rezystancji klucza analogowego, opóźnień czasowych w procesie kluczkowania, czy niedokładności wykonania poszczególnych rezystorów budujących mostek.

W celu wyznaczenia wpływu rozdzielczości układu na niepewność przetwarzania analogowo cyfrowego wyznaczono kwant rezystancji, czyli wielkość odpowiadającą zmianie o 1 liczby załączeń klucza Z . Przy podstawieniu $R_2=R_x$ i na podstawie zależności (11) otrzymano:

$$(Z+1) - Z = 2k \left(\frac{(R_x + q_x) R_4}{R_1 R_3} - \frac{R_4}{R_0} \right) - 2k \left(\frac{R_x R_4}{R_1 R_3} - \frac{R_4}{R_0} \right), \quad (12)$$

gdzie:

q_x – kwant przekładni.

Przekształcając powyższe równanie otrzymuje się:

$$q_x = \frac{1}{2k} \frac{R_1 R_3}{R_4}. \quad (13)$$

Błąd kwantowania rezystancji zmienia się w zakresie od 0 do q_x . Wynika stąd, że na rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego wpływ mają jedynie wartości rezystorów mostka. Błąd ten może być zmniejszany przez odpowiednie zwiększenie pojemności licznika k .

W układzie praktycznym z uwagi na nieodpowiedni dobór elementu kluczkującego, który charakteryzuje się wydłużonym czasem otwierania przez co wprowadzał dodatkowe opóźnienia, otrzymane wyniki zostały wykorzystane do aproksymacji zależności temperatury od liczby załączeń klucza. Ze względu na nieliniowość charakterystyki termoelementu Pt100, zależność rzeczywistą przybliżono wielomianem trzeciego rzędu:

$$\vartheta = -3,8464 + 0,0306 \cdot Z + 5,6535 \cdot 10^{-07} \cdot Z^2 - 5,6013 \cdot 10^{-11} \cdot Z^3. \quad (14)$$

Zrealizowano eksperyment pomiarowy weryfikujący zależność (14). Zestawienie wyników pomiarowych zawiera tabela 1,

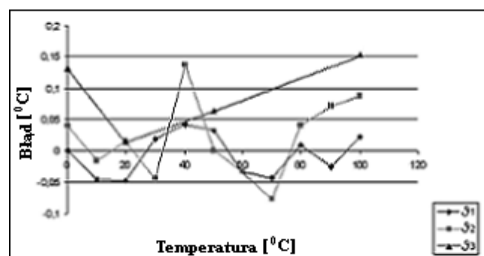
a zależności błędów pomiaru temperatury w funkcji temperatury przedstawia rys. 6.

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarowych
Tab. 1. Measurement results

ϑ [°C]	ϑ_1 [°C]	ϑ_2 [°C]	ϑ_3 [°C]
0	0,000	0,039	-0,131
10	10,046	10,015	-
20	20,048	19,985	19,985
30	29,981	30,044	-
40	39,957	39,862	-
50	49,946	49,999	49,935
60	60,193	60,032	-
70	70,043	70,076	-
80	79,991	79,958	-
90	90,026	89,928	-
100	99,977	99,912	99,846

gdzie:

- ϑ – temperatura zadana dla termorezystora Pt100;
- ϑ_1 – temp. otrzymana dla wzorcowego opornika dekadowego typu MDR-93-5aa, kl 0,05;
- ϑ_2 – temperatura otrzymana dla opornika dekadowego typu MDR-92-6a, kl 0,05;
- ϑ_3 – temp. otrzymana dla symulatora czujników platynowych PT100 typu S-Pt-100, kl 0,05.



Rys. 6. Błąd w funkcji temperatury
Fig. 6. Error in function of the temperature

5. Uwagi końcowe

Artykuł zawiera opis systemu pomiarowego, protokołu bezprzewodowej transmisji danych oraz zasadę pomiaru temperatury i identyfikację podstawowych źródeł błędów. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1 charakteryzując się niewielkimi błędami, które przedstawiono na rys. 6. Udało się uzyskać bardzo mały pobór energii przez przetworniki pomiarowe dzięki odpowiednio zsynchronizowanej transmisji danych wykorzystującej tryby obniżonego poboru mocy mikrokontrolera i trancivera. Rozdzielczość przetwarzania analogowo cyfrowego zależy wyłącznie od rezystorów w układzie mostka równoważonego ładunkowo. Słabym punktem układu jest element kluczujący, który ze względu na niedokładność generacji czasu załączenia klucza wprowadza główną niedokładność w przetwarzaniu. Należy zatem podjąć dalsze prace dotyczące modernizacji układu.

6. Literatura

- [1] Noty aplikacyjne: CC1000, Atmega32.
- [2] Piaskowy A.: Bezprzewodowy system kontroli czasu pracy pracowników oraz ich dostępu do urządzeń i pomieszczeń. Praca magisterska. Politechnika Śląska, Gliwice 2006.
- [3] Piaskowy A, Bogacz R.: Bezprzewodowy system monitorowania rozkładu temperatur pomieszczeń. Materiały konferencji naukowo-technicznej PPM'08.
- [4] Tync B.: Ładunkowo równoważony układ mostkowy do pomiaru temperatury. Materiały konferencji naukowo-technicznej PPM'03.
- [5] Tync B.: Analogowo-cyfrowe zrównoważone mostki rezystancyjne. Rozprawa doktorska, Gliwice 2007.
- [6] Jakubiec J.: Przetworniki pomiarowe wykorzystujące mostek równoważony ładunkowo. Pomiary Automatyka Kontrola, PAK nr 5, 2008 s. 280-285.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książka Wydawnictwa PAK



Charakteryzowano podstawowe założenia polityki krajów UE oraz strategii energetycznej Polski wobec OZE.

Na przełomie sierpnia i września 2007 roku ukazała się kolejna książka Wydawnictwa PAK autorstwa Tomasza Boczara pt.: Energia wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania.

W niniejszej książce przedstawiono aktualne możliwości wykorzystania energii wiatru do produkcji energii elektrycznej na obszarze Europy, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych zasobów i stopnia ich wykorzystania na terenie Polski, a także województwa opolskiego. Ponadto scharakteryzowano

skierowana jest przede wszystkim do studentów oraz wykładowców prowadzących zajęcia dydaktyczne na kierunkach elektrycznych, jak również związanych z inżynierią i ochroną środowiska. Opisane zagadnienia mogą stanowić materiał dydaktyczny związany z aktualnymi możliwościami oraz przyszłymi kierunkami w pozyskiwaniu energii wiatru do produkcji energii elektrycznej.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl