

Dominik RZEPKA, Łukasz KRZAK, Cezary WOREK
 AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Automatyzacja pomiarów pakietowej stopy błędów w cyfrowym torze radiowym

Mgr inż. Dominik RZEPKA

Ukończył studia na kierunku Elektronika na AGH a obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Jego zainteresowania obejmują radiowe techniki transmisji danych, przetwarzanie sygnałów cyfrowych i sprzętową implementację algorytmów.



e-mail: drzepka@agh.edu.pl

Mgr inż. Łukasz KRZAK

Absolwent kierunku Elektronika na AGH a obecnie asystent w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki. W swojej pracy zajmuje się bezprzewodowymi sieciami sensorowymi i przemysłowymi systemami radiokomunikacyjnymi. Jego zainteresowania obejmują również tworzenie oprogramowania dla systemów wbudowanych.



e-mail: lkrzak@agh.edu.pl

Dr inż. Cezary WOREK

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Elektroniki AGH. Jego badania skupiają się m.in. na zagadnieniach kompatybilności elektromagnetycznej, budowy zasilaczy impulsowych z rezonansową końcówką mocy, układów zasilania i systemów radiowych przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Jest współautorem ponad 40 publikacji czasopiśmiennych i materiałach konferencyjnych, oraz kilku patentów.



e-mail: worek@agh.edu.pl

Streszczenie

Ocena jakości cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego polega najczęściej na określeniu stopy błędów dla różnych stanów kanału transmisyjnego. W artykule przedstawiono przykładowy tor pomiarowy, umożliwiającą automatyzację tego rodzaju testów. Przeanalizowano również zależność dokładności pomiaru od ilości odebranych danych oraz zbadano wpływ iteracyjnego wyznaczania ilości danych na błąd pomiaru.

Słowa kluczowe: pakietowa stopa błędów, PER, tor radiowy, automatyzacja pomiarów.

Automation of packet error rate measurements in digital radio link

Abstract

Design of digital radio networks requires procedures for verification of transmission quality for every device participating in data exchange. The primary criterion of quality level is measurement of packet error rate (PER). A testbed presented in this paper enables automation of such measurements according to a programmable scenario, using control interfaces of measurement devices and processing results. The test transmitter consists of a RF signal generator modulated with the signal from an arbitrary pattern generator. A PC computer generates a test signal, controls and processes the data. The required precision of PER (P_b) measurements can be achieved by sending a certain number of test frames (n), which can be evaluated analytically [1]. The presented radio testbed was used for projects "Radio voice communication and remote control system for safety blockades and machinery, designed to work in underground coal mines" [2] and "Photovoltaics and sensors in environmental development of Małopolska region", for verification of detection and synchronization algorithms designed and implemented on FPGA devices [3]. It resulted in significant decrease of the measurements time and effort, accelerating diagnostics for radio modules.

Keywords: packet error rate, PER, radio testbed, measurement automation.

1. Wstęp

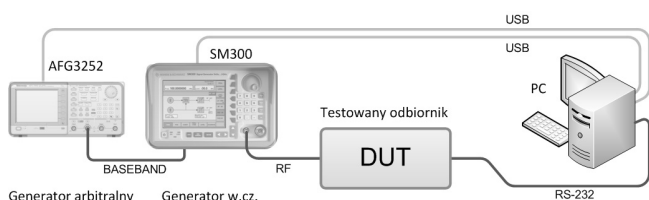
Proces projektowania cyfrowych systemów transmisyjnych wymaga procedur, które umożliwią weryfikację działania i ocenę poszczególnych urządzeń w zakresie jakości transmisji.

Jakościowe kryteria oceny mogą bazować na obserwacji cech sygnałów analogowych, takich jak kształt widma sygnału radiowego albo kształt przebiegu czasowego sygnału w paśmie podstawowym. Sformułowanie kryteriów ilościowych jest dla systemów cyfrowych stosunkowo łatwe, ponieważ opiera się na prostym porównaniu danych cyfrowych na wejściu i wyjściu badanego toru transmisyjnego. Ogólnym wskaźnikiem jakości otrzymywanym przy takim porównaniu jest symbolowa stopa błędów, równa stosunkowi ilości symboli błędnie odebranych do ilości wszystkich przesłanych symboli. Dla transmisji binarnych odpowiednikiem tego pojęcia jest bitowa stopa błędów (ang. bit error rate, BER). Stopa błędów mierzona jest najczęściej w funkcji zmiennego tłumienia toru transmisyjnego, które można w praktyce uzyskać przy połączeniu przewodowym nadajnika i odbiornika z wykorzystaniem regulowanego tłumika. Technika ta jednak nie umożliwia zaobserwowania efektów związanych ze specyfiką propagacji fal elektromagnetycznych (np. efektem wielodrogowości). Przy pomiarach na odległość pojawia się natomiast problem równoległego przesyłania referencyjnego ciągu nadawanych bitów, koniecznego do obliczania BER. Pomiar BER zakłada również, iż znane jest opóźnienie czasowe wprowadzane przez badany tor, co pozwala pominąć kwestie związane z odtwarzaniem zegara transmisji z danych. W praktyce dla niskich stosunków sygnału do szumu (ang. signal to noise ratio, SNR) lub przy dużych zniekształceniach sygnału algorytmy detekcji transmisji i utrzymywania synchronizacji stosowane w odbiornikach odgrywają kluczową rolę [3]. Również z punktu widzenia oceny działania systemu radiowego wykorzystującego większe jednostki informacji – pakiety, BER nie jest wygodnym kryterium, ponieważ odnosi się on do działania najniższych warstw klasycznego modelu OSI/ISO, nie uwzględniając np. zastosowanej korekcji błędów oraz jej wpływu na ewentualną retransmisję pakietu. Z tego względu częściej bardziej użytecznym kryterium oceny jakości transmisji radiowej jest pakietowa stopa błędów (ang. packet error rate, PER) definiowana jako stosunek ilości błędnie odebranych pakietów do ilości wszystkich przesłanych pakietów. Pomiar PER uwzględnia działanie wszystkich mechanizmów mających wpływ na odbiór informacji, łącznie z algorytmami synchronizacji, odtwarzania zegara transmisji, dekodowania i walidacji poprawności pakietu (np. na podstawie zawartej w nim sumy kontrolnej).

Zaproponowany tor testowy został zastosowany przy tworzeniu radiowego systemu łączności głosowej, blokad i sterowania maszynami dedykowanymi w węglowym górnictwie podziemnym (projekt rozwojowy nr 12331) [2], a także w projekcie „Fotowoltaika i sensory w proekologicznym rozwoju Małopolski”. Wykorzystano w nim transmisję binarną z modulacją GFSK, działającą z przepływnością 19.2-57.6kb/s w pasmach ISM 433MHz i 868MHz.

2. Budowa toru pomiarowego

Ponieważ najczęściej kluczowym z punktu widzenia jakości transmisji elementem toru jest odbiornik dlatego to ocena jego działania jest głównym przedmiotem testów. Zaprojektowany tor pomiarowy został wyposażony we wzorcowy nadajnik, zrealizowany za pomocą generatora w.cz. SM300 firmy Rohde-Schwarz modulowanego sygnałem z generatora przebiegów arbitralnych AFG3252 firmy Tektronix (rys. 1).



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego

Fig. 1. Schematic diagram of the measurement testbed

Sygnal pasma podstawowego odpowiadający nadawanej wzorcowej ramce jest tworzony w programie Matlab, poprzez odpowiednią filtrację (w naszym przypadku filtr Gaussa) danych w formacie NRZ. Następnie jest on przesyłany do pamięci generatora arbitralnego poprzez złącze USB, skąd dane odczytywane są cyklicznie. Sterowanie w ten sposób jedynie wejściem modulującym częstotliwość generatora sygnałowego SM300 utrudnia realizację dobrego modelu nadajnika, ponieważ nawet zerowy sygnał modulujący w czasie trwania odstępu między dwoma kolejnymi ramkami nie powoduje wyłączenia generatora w.cz., lecz generowanie sygnału o częstotliwości nośnej. W trakcie testów zauważono, że obecność takiego stałego sygnału niekorzystnie wpływa na zdolności detekcyjne badanych układów radiowych. Odpowiada on bowiem transmisji pojedynczego poziomu logicznego, co w transmisji radiowej stanowi sygnał zdegenerowany, bardzo rzadko występujący w praktyce. Aby lepiej przybliżyć działanie rzeczywistego toru radiowego, w trakcie trwania odstępów międzyramkowych generator arbitralny przesyła do generatora w.cz. przebieg odpowiadający szerokopasmowemu szumowi białemu.

Za kontrolę procedury pomiarowej odpowiada program działający na komputerze PC, wykorzystujący udostępnione przez producenta sterowniki generatora w.cz.. Umożliwia to sterowanie mocą oraz częstotliwością sygnału w.cz.. Komunikacja z testowanym odbiornikiem (ang. device under test, DUT) odbywa się poprzez protokół RS-232. Ponieważ analizowana jest pakietowa stopa błędów, to do interpretacji otrzymanych danych wykonywane oprogramowanie zgodnie z protokołem komunikacyjnym i zaimplementowane w testowanym radiomodemie. Raportowane są następujące zdarzenia:

- Poprawne odebranie ramki
- Odebranie ramki z błędem
- Błędna synchronizacja ramki (błąd w ciągu synchronizującym)
- Wykrycie sekwencji synchronizacyjnej bez symbolu początku ramki (domniemana fałszywa detekcja)
- Zgubienie ramki (przekroczenie czasu oczekiwania)

W przypadku testowanego przez autorów systemu, oprogramowanie radiomodemu zostało wyposażone w procedury zapewniające zbieranie statystyk pomiarowych tak, że informacje wymieniane z komputerem ograniczone zostały do podsumowania rapor-

tu zebranego w trakcie pomiaru dla danych parametrów sygnału w.cz..

3. Dokładność pomiarów

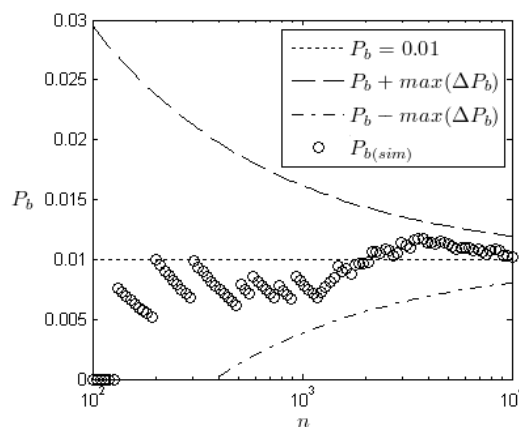
Przedmiotem pomiaru PER jest prawdopodobieństwo błędnego odebrania danych przez odbiornik radiowy, powodującego niemożliwe do korekcji uszkodzenie pakietu. Można je więc zamodelować jako prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia błędnego odbioru pakietu (P_b) w rozkładzie dwumianowym [1]. Aby określić to prawdopodobieństwo z nieskończoną precyzją konieczna byłaby nieskończona liczba prób losowych (przesłanych ramek). W praktyce jest ona skończona i z twierdzenia de Moivre'a-Laplace'a wynika, że błąd przybliżenia P_b ma charakter zmiennej losowej o rozkładzie normalnym i odchyleniu standardowym malejącym wraz z pierwiastkiem liczby prób n :

$$\Delta P_b \sim N\left(0, \sqrt{\frac{P_b(1-P_b)}{n}}\right) \quad (1)$$

Dla danego poziomu ufności p wartość błędu bezwzględnego pomiaru PER w funkcji liczby przesłanych ramek n wynosi (2), gdzie $\Phi^{-1}(x)$ to funkcja odwrotnej dystrybuanty rozkładu normalnego:

$$|\Delta P_b| \leq \Phi^{-1}\left(\frac{p+1}{2}\right) \sqrt{\frac{P_b(1-P_b)}{n}} \quad (2)$$

Jako poziom porównawczy dla testów przyjęto $P_b = 0,01$ co oznacza, iż statystycznie jeden na sto pakietów odbierany jest błędnie. Na rys. 2. pokazano górne i dolne ograniczenie wyniku pomiaru P_b przy poziomie ufności $p = 0,95$, oraz przykładowy przebieg pomiaru, zasymulowany w programie Matlab.



Rys. 2. Maksymalny błąd $\tilde{P}_b(n)$ dla $p = 0,95$

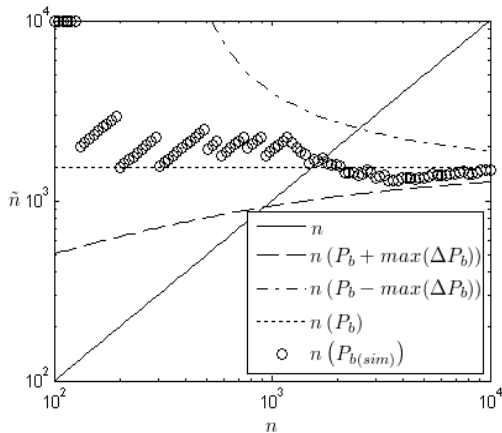
Fig. 2. Maximum error $\tilde{P}_b(n)$ for $p = 0,95$

Błąd względny $\Delta P_b / P_b$ pomiaru PER przy stałym n jest zależny od wartości mierzonej i rośnie dla małych P_b . Wprowadzenie adaptacji liczby prób n pozwala uzyskać podobne wartości błędów względnych w całym zakresie mierzonej pakietowej stopy błędów oraz lepiej wykorzystać czas pomiaru.

Ponieważ do obliczenia liczby prób n potrzebna jest znajomość P_b , które jest wartością mierzona, możliwe więc jest jedynie sukcesywne szacowanie n na podstawie coraz lepszego przybliżenia \tilde{P}_b . Po przekształceniu (2) i uzależnieniu błędu bezwzględnego od \tilde{P}_b poprzez stałą k , zależność na minimalną liczbę prób n przyjmując postać:

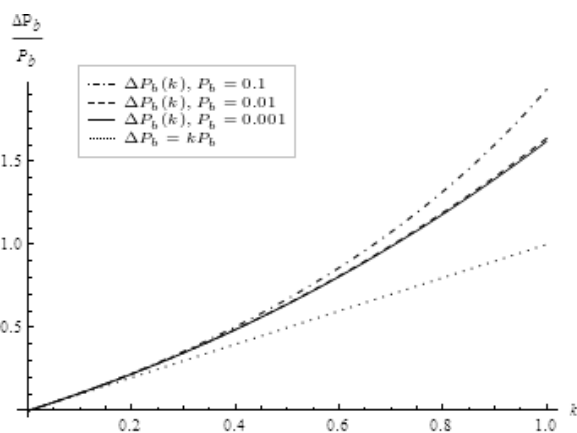
$$\tilde{n} = \left[\frac{\sqrt{\tilde{P}_b(1-\tilde{P}_b)}}{k \cdot \tilde{P}_b} \Phi^{-1} \left(\frac{P_\varepsilon + 1}{2} \right) \right]^2 \quad (3)$$

Na rys. 3. pokazano wykresy szacowanej liczby prób dla $P_b = 0,01$, $k = 0,5$ i $p = 0,95$. Wpływ błędu oszacowania \tilde{P}_b na oszacowanie \tilde{n} powoduje, że liczba wykonanych prób może być zarówno większa jak i mniejsza od tej, która konieczna jest do uzyskania błędu $|P_b| \leq k \cdot P_b$. Badanie PER jest przerywane, gdy $\tilde{n}(\tilde{P}_b) > n$, a więc największy błąd ΔP_b ma szanse wystąpić w sytuacji gdy $\tilde{P}_b \approx P_b + \max(\Delta P_b(n))$. Aby dokładnie określić wartość tego błędu należałoby rozwiązać (3) uwzględniając zależność $\tilde{P}_b(n)$, a następnie otrzymane n podstawić do (2). Zadanie to zostało wykonane przy użyciu pakietu Mathematica, jednak wynikowa zależność była zbyt rozbudowana, żeby można było ją przytoczyć.



Rys. 3. Estymacja n na podstawie $\tilde{P}_b(n)$
 Fig. 3. Estimation of n based on $\tilde{P}_b(n)$

Na rys. 4 przedstawiono natomiast uzyskane na jej podstawie wykresy, obrazujące relację między zadaniem błędem bezwzględnym k i jego rzeczywistą, maksymalną wartością dla $p = 0,95$.



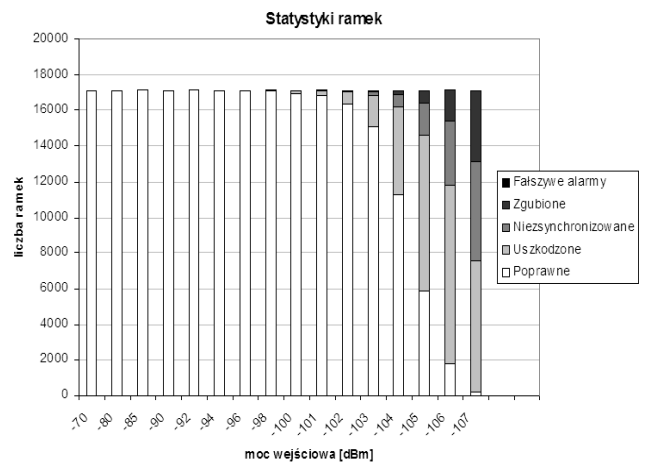
Rys. 4. Maksymalny błąd $\Delta P_b(k, P_b)$ przy iteracyjnym wyznaczaniu n
 Fig. 4. Maximum error $\Delta P_b(k, P_b)$ at iterative computation of n

Rzeczywisty błąd bezwzględny w iteracyjnej metodzie wyznaczania n jest zatem zawsze większy od zadanego k . Różnica ta zależy od samego k i wartości badanego P_b , przy czym dla małych P_b zależność zmienia się nieznacznie (wykresy przy $P_b = 0,01$ i $P_b = 0,001$ mają już bardzo podobny przebieg).

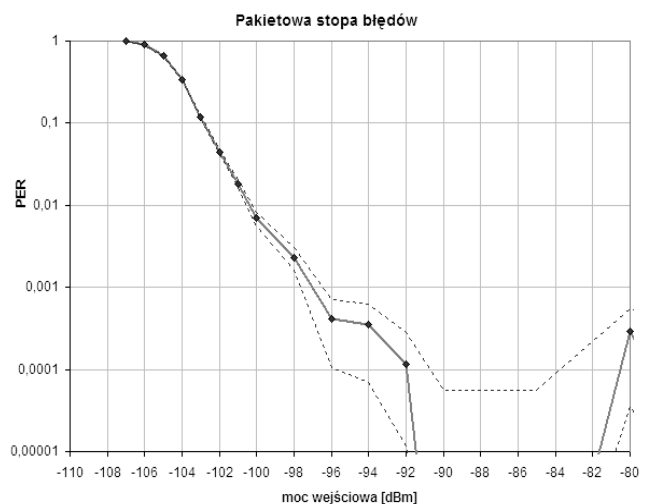
4. Przykładowe wyniki

Na rys. 5 i 6 zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów PER, przeprowadzone dla radiomodemu wykorzystującego moduł CC1020 (pracujący w paśmie 869.5MHz z przepływnością 57.6kb/s) oraz autorski algorytm detekcji i synchronizacji [3].

Podczas testów, ze względu na prostotę rozwiązania zastosowano stałą ilość ramek $n = 17000$, co zgodnie z przedstawionym modelem matematycznym ograniczyło dokładność dla niskich poziomów PER (możliwe rzeczywiste wartości dla poziomu ufności $p = 0,95$ oznaczono przerywanymi liniami). Dla zakresu $-82\text{dBm} \div -91\text{dBm}$ nie zaobserwowano żadnych błędnie odebranych ramek. Przy niższych poziomach mocy pierwszym efektem przekłamań w transmisji są uszkodzenia na polu danych w ramach (rys. 5). Ze względu na mniejszą długość pola preambuły błędy synchronizacji występują rzadziej, najradszym zaś efektem jest całkowite zgubienie ramki.



Rys. 5. Przykładowe statystyki ramek
 Fig. 5. Example of frames statistics



Rys. 6. Przykładowe wyniki pomiaru PER
 Fig. 6. Example of PER measurement results

5. Podsumowanie

Automatyczny tor pomiarów pakietowej stopy błędów umożliwił znaczne skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie pomiarów, ograniczenie problemów wynikających z komplikacji obsługi urządzeń pomiarowych oraz przyspieszył diagnostykę badanych

modułów radiowych. Zaprezentowana zależność między ilością prób testowych a błędem pomiaru pozwala określić wiarygodność wyników i dostosować czas pomiaru do założonych wymagań.

6. Literatura

- [1] Rzepka D.: Analiza i budowa testowego toru radiowego wykorzystującego wielodostęp CDMA i pracującego z rozproszonym widmem. Katedra Elektroniki, Wydział EAIiE, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, p.1-91 (2009).
- [2] Worek C., Krzak Ł.: Cyfrowa, bezprzewodowa platforma komunikacyjna dla nowoczesnych systemów automatyki, sterowania i komuni-

kacji głosowej w przemyśle wydobywczym. Międzynarodowy Kongres Górnictwa Rud Miedzi, Volume 1, Lubin, p.86-95 (2009).

- [3] Krzak Ł., Rzepka D.: Niskomocowa metoda przetwarzania danych w paśmie podstawowym dla bezprzewodowych sieci sensorowych, z wykorzystaniem układów FPGA. Elektronika, Volume 6/2008, p.45-46 (2008).

otrzymano / received: 29.03.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

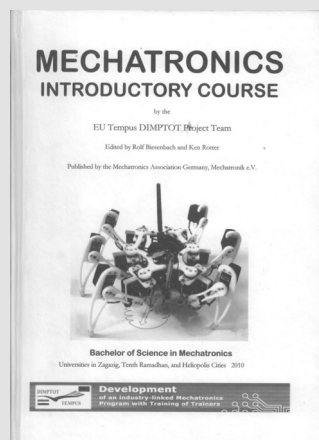
artykuł recenzowany

RECENZJE

Mechatronics Introductory Course Book

Edited by: Rolf Biesenbach and Ken Rotter

Published by the Mechatronics Association Germany, Mechatronik e.V., 2010, pp. 242, ISBN 978-3-9813468-0-0



Podręcznik akademicki „Mechatronics Introductory Course” został opracowany w ramach międzynarodowego programu UE TEMPUS MEDA „Development of an industry-linked Mechatronics Program with Training of Trainers” (DIMPToT). Program DIMPToT był realizowany w latach 2007-2010 przez konsorcjum, złożone z: Bochum University (Niemcy), Politechnika Śląska w Gliwicach, London South Bank University (Wielka Brytania), Zagazig University

(Egipt) i Higher Technological Institute (Egipt), stowarzyszenie naukowe: Mechatronik e.V. i 2 firmy przemysłowe: E. ON Ruhrgas AG (Niemcy) i Sekem Development Foundation (Egipt).

Podręcznik jest przeznaczony dla studentów mechatroniki (stopień inżynierski). Obejmuje on doświadczenia dydaktyczne i szkoleniowe wszystkich wyżej wymienionych partnerów. Będzie istotną pomocą dydaktyczną w realizacji wzorcowych studiów z zakresu mechatroniki na uczelniach w Egipcie oraz w Europie.

Podręcznik jest podzielony na 2 części. Pierwsza (Engineering problems in mechatronics education), jest przeznaczona dla studentów, zaś druga (Pedagogical, methodological and social issues in contemporary engineering studies) – dla wykładowców. Głównym elementem pierwszej części są instrukcje laboratoryjne do zajęć, prowadzonych w czterech laboratoriach, określających tzw. Mechatronics Main Stream Laboratory (str: 39-118).

- A) Laboratory of Drives, Actuators & Motion Control
- B) Laboratory of Robotics, Sensors and Vision Systems
- C) Laboratory of Microprocessors and Programmable Logic Controllers
- D) Computer Laboratory for Engineering Graphics and Simulation Technology.

Część ta została opracowana przez zespół polskich autorów, pracowników Katedry Mechatroniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Krzysztof Kluszczyński, Grzegorz Kłapyta, Marcin Szczygieł, Damian Krawczyk, Paweł Kielan, Jarosław Domin, Wojciech Bulikowski i Tomasz Trawiński).

Instrukcje laboratoryjne są pomyślane jako wzorce dla różnych typów ćwiczeń i opracowane są według jednolitego standardu, obejmującego: cele, wyposażenie stanowiska (hardware i software), program eksperymentów, przykładowe wyniki i rozwiązania, sprawozdanie, literaturę oraz pytania. Cechą charakterystyczną jest bardzo duża liczba fotografii, rysunków, schematów i tabel. Należy podkreślić, że instrukcje zostały opracowane w sposób uwzględniający założenia i wymogi dla studiów inżynierskich i są w pełni zgodne z duchem Konwencji Bolońskiej, różniącej i określającej wyraźnie zakres wiedzy, stopień rozumienia oraz kompetencje, nabywane przez studentów w ramach studiów I stopnia oraz – później – II stopnia. Pozostałe rozdziały części pierwszej są poświęcone wykorzystaniu programu Matlab/Simulink w typowych zadaniach inżynierskich oraz wybranym zagadnieniom z robotyki. Część druga koncentruje się na zagadnieniach metodologicznych (realizacja prac projektowych o charakterze zespołowym, e-learning, elementy zarządzania, prowadzenie zajęć w wielonarodowościowych grupach studentów itp.).

W roku akademickim 2010/11 podręcznik będzie wykorzystywany w ramach zajęć dydaktycznych na Zagazig University (czołowa uczelnia państwowa Egiptu, licząca 110 tys. studentów), Higher Technological Institute (uczelnia prywatna, będąca w Egipcie liderem w zakresie robotyki), jak też na Politechnice Śląskiej w Gliwicach w ramach zajęć prowadzonych w języku angielskim na Wydziale Elektrycznym.

Podręcznik, o formacie A4, został wydany w nakładzie 3000 egzemplarzy czarno-białych i 300 egzemplarzy kolorowych w twardej oprawie.

Opracowanie: Krzysztof KLUSZCZYŃSKI