

## Roman WYŻGOLIK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI, ZAKŁAD SYSTEMÓW POMIAROWYCH

# IEEE 1451 – interfejs przetwornika inteligentnego

dr inż. Roman WYŻGOLIK

Pracę doktorską obronił w 2003 r. na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki. Jego zainteresowania koncentrują się wokół zagadnień związanych z inteligentnymi przetwornikami pomiarowymi, systemami pomiarowymi, przetwarzaniem danych pomiarowych, oprogramowaniem LabVIEW.



e-mail: roman.wyzgolik@polsl.pl

### Streszczenie

W referacie omówiono standard IEEE 1451, stworzony z myślą o tzw. inteligentnych przetwornikach. Jak podają autorzy standardu, pod terminem „przetwornik” rozumieć należy zarówno czujniki oraz przetworniki pomiarowe jak i akulatory. Głównie skupiono się na normie IEEE 1451.4, będącej częścią wspomnianego standardu. Podano przykłady zastosowań standardu w pracach własnych prowadzonych w Zakładzie Systemów Pomiarowych Instytutu Automatyki.

**Słowa kluczowe:** IEEE 1451, czujniki i przetworniki pomiarowe, systemy pomiarowe.

## IEEE 1451 – standard for a smart transducer interface

### Abstract

In the paper, the IEEE 1451 standard for a smart transducer interface is discussed. The transducer is either a sensor or an actuator. The paper focuses mainly on IEEE 1451.4, the part of the IEEE 1451 standard. Also, the area of application of the standard in Measurement System Group of Automatic Control Faculty is presented.

**Keywords:** IEEE 1451, sensors and transducers, measuring systems.

## 1. Wstęp

Temat standardu IEEE 1451 poruszony został ponad 10 lat temu, kiedy jego pomysłodawcom wydawało się, że konkurencyjne do siebie standardy sieciowe i protokoły wykorzystywane w przemysłowych sieciach kontrolno – pomiarowych, spowodują nadmierne skomplikowanie konfiguracji takich sieci oraz wzrost kosztów zakupu nowej aparatury kontrolno – pomiarowej.

W 1996 roku po raz pierwszy oficjalnie, w postaci normy IEEE 1451.2 pojawiła się koncepcja interfejsu dla inteligentnych przetworników – przy czym pod nazwą przetwornik kryje się zarówno czujnik czy przetwornik pomiarowy jak i akuator (element wykonawczy). Obecnie istnieje seria norm opisujących standard interfejsu inteligentnego, tzw. standard IEEE 1451, z których każda opisuje pewną część interfejsu (wspólna nazwa standardu to IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators). Poniżej przedstawiono aktualny stan normalizacji w zakresie omawianego standardu – normy z oznaczeniem P są w fazie projektu.

**IEEE P1451.0** Common Functions, Communications Protocols and Transducer Electronic Data Sheets (TEDS) Formats – wspólne funkcje, protokoły komunikacyjne i formaty elektronicznej karty katalogowej przetwornika – w opracowaniu.

**IEEE Std 1451.1-1999** Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model – model informacyjny procesora sieciowego [1] – norma opublikowana, obecnie aktualizowana.

**IEEE Std 1451.2-1997** Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats – protokoły komunikacyjne przetwornik-mikroprocesor i formaty elektronicznej karty katalogowej przetwornika [2] – norma opublikowana, obecnie aktualizowana.

**IEEE Std 1451.3-2003** Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems – komunikacja cyfrowa i formaty elektronicznej karty katalogowej przetwornika dla rozproszonych systemów połączeń wielopunktowych [3] – norma opublikowana.

**IEEE Std 1451.4-2004** Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats – protokoły komunikacyjne trybu mieszanego i formaty elektronicznej karty katalogowej przetwornika [4] – norma opublikowana.

**IEEE P1451.5** Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats – protokoły komunikacji bezprzewodowej i formaty elektronicznej karty katalogowej przetwornika – w opracowaniu.

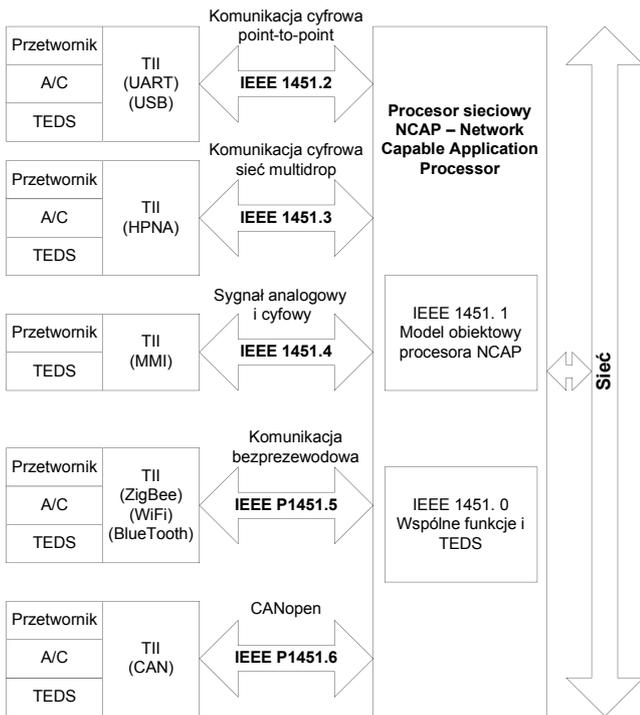
**IEEE P1451.6** A High-speed CANopen-based Transducer Network Interface for intrinsically safe and non-intrinsically safe applications – szybki interfejs sieciowy przetwornika oparty na CANopen dla zastosowań iskrobezpiecznych i nieiskrobezpiecznych – w opracowaniu

Na rys.1 zestawiono wszystkie normy w sieć. Każda norma jest tak zaprojektowana, że może być wykorzystany łącznie z pozostałymi lub niezależnie. I tak na przykład dla IEEE 1451.X (X = 2, 3, 4, 5, 6, ...) rolę procesora sieciowego z IEEE 1451.1 może przejąć dowolne urządzenie, zwykle jest to komputer PC z odpowiednim oprogramowaniem.

## 2. Struktura przetwornika inteligentnego według IEEE 1451

Struktura inteligentnego przetwornika zgodnego z standardem IEEE 1451 pokazana jest na rys.2. Ideą standardu było wprowadzenie technologii plug and play, ułatwiającej dołączanie przetwornika dowolnego producenta do dowolnej sieci kontrolno – pomiarowej tak, aby niezależnie przetwornik od protokołu wykorzystywanego w danej sieci. Interfejsem sieciowym miał być specjalny procesor sieciowy, tzw. NCAP – Network Capable Application Processor. Koncepcja nie do końca się przyjęła, jednak pewne elementy standardu okazały się niezwykle użyteczne. W szczególności ostatnia z serii przyjętych norm – IEEE 1451.4 wprowadza ciekawe rozwiązania techniczne, które na świecie, szczególnie wśród producentów czujników i systemów pomiarowych, znalazły uznanie i zostały tym samym wdrożone do oferowanych przez nich produktów.

To, co zdecydowało o popularności standardu to wprowadzenie szablonów TEDS (patrz rys.2 Elektroniczna karta katalogowa – TEDS) – informacji o czujniku/przetworniku zamieszczonych w pamięci elektronicznej, np. EEPROM, które to informacje umożliwiają niemal bezobsługową konfigurację przetwornika w systemie (patrz rys.3, Sygnał cyfrowy (dane)). Opracowano szereg szablonów TEDS dla różnego rodzaju czujników. Szablony te, w zamierzeniu twórców normy, powinny wyczerpać zakres dostępnych i powszechnie wykorzystywanych czujników.



Rys. 1. Zestawienie norm serii IEEE 1451  
Fig. 1. Set of the IEEE 1451 standards

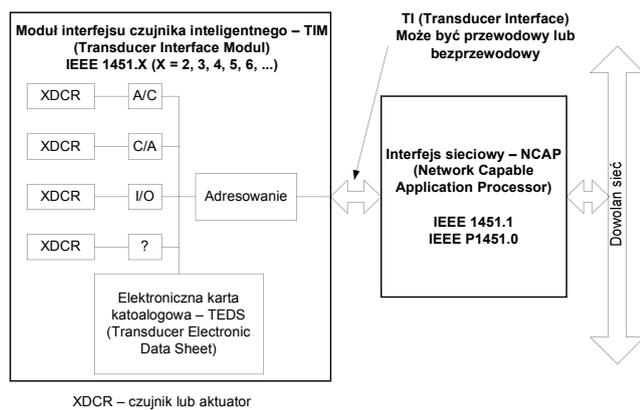
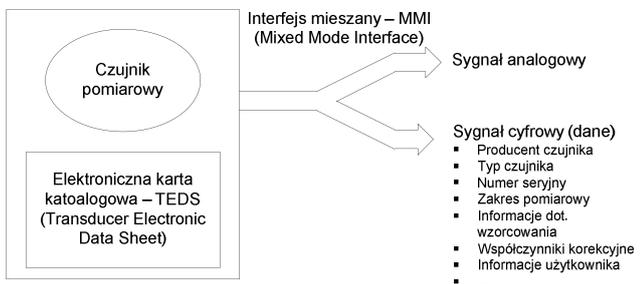


Fig. 2. Structure of the smart transducer [5]  
Rys. 2. Struktura przetwornika inteligentnego [5]

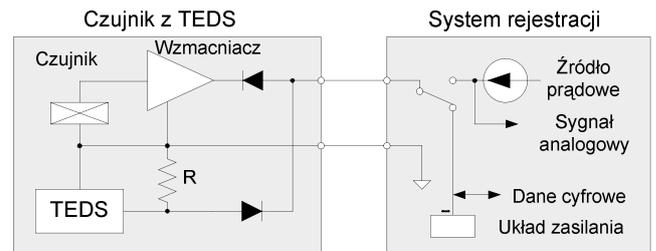


Rys. 3. Moduł czujnika pomiarowego wyposażonego w elektroniczną kartę katalogową TEDS  
Fig. 3. Module of the smart sensor with TEDS

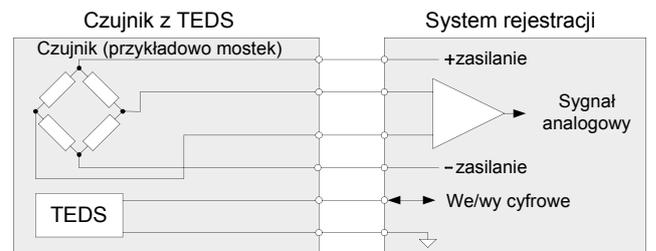
Rozwiązania techniczne zawarte w normie IEEE 1451.4 można stosować do czujników w istniejących już systemach pomiarowych. W najprostszym przypadku wystarczy wówczas skorzystać z tzw. Virtual TEDS, czyli informacji TEDS zapisanych na dysku komputera, z których skorzystać należy przy konfiguracji kanałów pomiarowych urządzenia rejestrującego. Kolejnym rozwiązaniem jest doposażenie czujnika w pamięć EEPROM – najczęściej wiąże się to ze zmianą okablowania

(w nowym kablu pamięć TEDS instalowana jest przy złączu od strony czujnika lub urządzenia rejestrującego, ewentualnie w dowolnym miejscu kabla jako dodatkowy moduł). Należy jednak wówczas zakupić lub opracować i zbudować urządzenie rejestrujące (np. komputer PC + karta przetworników analogowo –cyfrowych kompatybilna z TEDS + moduł zacisków wejściowych TEDS) umożliwiające odczyt i ewentualny zapis danych do pamięci TEDS.

Do podłączenia czujnika do urządzenia rejestrującego zaprojektowano tzw. interfejs mieszany MMI (Mixed Mode Interface). Zaproponowane zostały dwie klasy interfejsu MMI, różniące się sposobem podłączenia czujnika wyposażonego w pamięć TEDS do NCAP lub jakiegokolwiek systemu rejestracji danych pomiarowych. Oba interfejsy, pokazane na rys.4 i rys.5, w części cyfrowej (odczyt i zapis pamięci TEDS) bazują na protokole 1-Wire, opracowywanym przez firmę Maxim-Dallas Semiconductor. Interfejs klasy 1 opracowano głównie dla piezoelektrycznych akcelerometrów i mikrofonów, w których zasilanie wbudowanego w czujnik wzmacniacza dostarczane jest przewodem sygnałowym. Tam, gdzie nie jest możliwe współdzielenie przewodu sygnałowego dla danych cyfrowych TEDS i sygnału pomiarowego (analogowego), wykorzystuje się interfejs klasy 2. Część analogowa pozostaje niezmienną dla danego czujnika pomiarowego (np. dla rezystancyjnego czujnika temperatury można wykorzystać 2, 3 lub 4 przewody w zależności od wybranej metody pomiaru rezystancji).



Rys. 4. Interfejs MMI klasy 1  
Fig. 4. Class 1 MMI



Rys. 5. Interfejs MMI klasy 2  
Fig. 5. Class 2 MMI

### 3. Szablony TEDS w IEEE 1451.4

To, co stanowi siłę normy IEEE 1451.4, zdaniem autora stanowi jednocześnie jej słabość. Mowa tutaj o szablonach TEDS. Szablon TEDS jest częścią elektronicznej karty katalogowej TEDS, i zawiera dane dotyczące konkretnego typu i konkretnego egzemplarza czujnika. Zawartość TEDS przedstawiono w tab. 1.

Do poprawnej konfiguracji czujnika w systemie pomiarowym wystarczą informacje zawarte w Basic TEDS, które są obligatoryjne. Pozostałe informacje, czyli szablon standardowy, szablon kalibracji oraz dane użytkownika są opcjonalne. Basic TEDS zawierają jedynie informacje odnośnie producenta i modelu czujnika pomiarowego. Dla pełniejszej konfiguracji czujnika w systemie, konieczne jest wykorzystanie szablonów.

Opracowano 16 szablonów standardowych starając się ująć wszystkie dostępne na rynku typy czujników, co nie do końca stało się możliwe [6]. I tak mamy np. szablony dla termoelementów, czujników przyspieszenia, tensometrów. Są też

trzy szablony uniwersalne, dla czujników z wyjściem napięciowym, rezystancyjnym i prądowym.

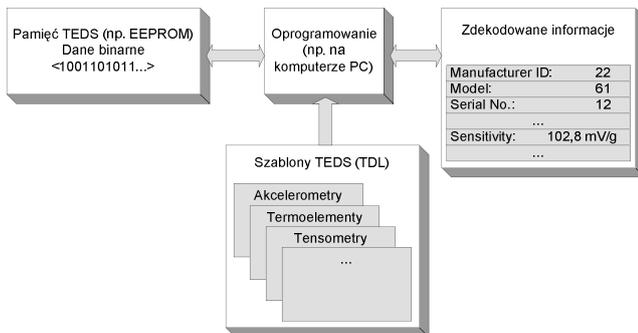
Szablony kalibracji wykorzystane mogą być do zapisania charakterystyki przetwarzania czujnika uzyskanej w procedurze kalibracji, zaś dane użytkownika mogą zawierać np. informację o miejscu zamocowania czujnika w instalacji pomiarowej.

Tab. 1. Zawartość elektronicznej karty katalogowej TEDS  
Tab. 1. The content of the TEDS

Informacje podstawowe (Basic TEDS) 64 bity
Szablon standardowy (Standard Template TEDS; identyfikator od 25 do 39)
Szablon kalibracji (Calibration Template TEDS; identyfikatory od 40 do 42)
Dane użytkownika (User Data)

Wspomnianą słabością szablonów TEDS jest format zapisu danych. Wszystkie dane zawarte w elektronicznej karcie katalogowej nie mogą zajmować więcej niż 256 bitów dla jednego czujnika. Aby to uzyskać stworzono specjalny interpreter danych zapisanych w TEDS, zwany TDL – Template Description Language. Tak więc poszczególne bity zawarte w TEDS są dekodowane z wykorzystaniem szablonu, dla konkretnego czujnika, zapisanego w języku TDL, jak to schematycznie pokazano na rys.6. Wyjątek stanowią wartości liczbowe, określające np. czułość czy współczynniki charakterystyki przetwarzania, które są zapisane bezpośrednio w pamięci TEDS czujnika.

Szablony zapisane są w formie ASCII. Format szablonów jest dość skomplikowany i trudny do implementacji w systemach osadzonych, szczególnie jeśli system ma być uniwersalny i umożliwić podłączenie czujników różnych wielkości.



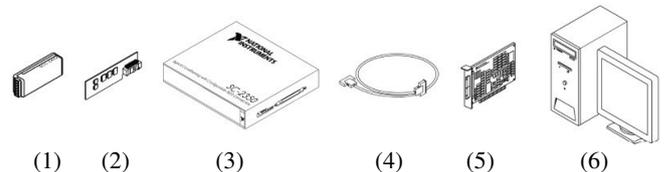
Rys. 6. Dekodowanie i kodowanie informacji TEDS  
Fig. 6. Encoding of the TEDS information

#### 4. Wykorzystanie IEEE 1451 w pracach własnych

W Zakładzie Systemów Pomiarowych kompletowana jest aparatura kompatybilna z technologią opartą o normę IEEE - 1451.4. Aparatura wykorzystywana jest w pracach dotyczących kalibracji czujników i przetworników pomiarowych jak i dydaktyce. I tak np. część aparatury wejdzie w skład stanowiska do wzorcowania czujników temperatury. Stanowisko jest skomputeryzowane i wykorzystywane są na nim różne interfejsy pomiarowe. Część bazująca na IEEE 1451.4 złożona jest (patrz rys.7) z komputera PC wyposażonego w kartę wejść/wyjść analogowych i cyfrowych, modułu kondycjonującego dla czujników pomiarowych różnego typu, zależnie od wyposażenia dodatkowego – obecnie moduł wyposażony jest w wejścia (SCC)

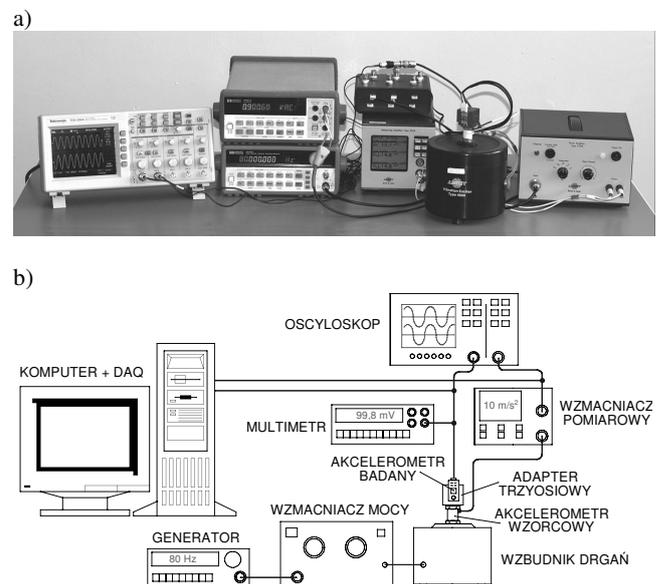
typu feedthrough oraz wejścia dla termoelementów i rezystancyjnych czujników temperatury Pt100.

Na chwilę obecną, stanowisko kompatybilne jest z czujnikami wyposażonymi w interfejs mieszany (MMI) klasy 2. Można podłączyć również czujniki nie wyposażone w pamięć TEDS i korzystać z informacji TEDS zapisanych w pliku (wspomniane w rozdziale drugim Virtual TEDS). Jako pamięć TEDS wykorzystuje się układ DS2431 firmy Maxim-Dallas. Uzupełnieniem stanowiska jest oprogramowanie LabVIEW.



Rys. 7. System pomiarowy kompatybilny z TEDS: (1) moduł kondycjonujący SCC, (2) moduł zasilający, (3) moduł wejść SC-2350, (4) kabel połączeniowy, (5) karta DAQ NI PCI-6221, (6) komputer PC  
Fig. 7. Measurement system compatible with TEDS: (1) SCC signal conditioning module, (2) power unit, (3) SC-2350 – SCC carrier module, (4) cable, (5) DAQ board NI PCI-6221, (6) PC

Ponadto prowadzi się prace nad wprowadzeniem rozwiązań opartych o ww. normy do czujników przyspieszenia wykorzystywanych w pomiarach biomedycznych. W Zakładzie Systemów Pomiarowych prowadzono badania porównawcze czujników drgań opartych o monolityczne czujniki przyspieszenia różnych firm [7]. Ze względu na niewielkie rozmiary i wagę, czujniki takie stosuje się między innymi w stabilografii, pomiarach drżenia dłoni czy badaniach ruchu i drgań robota kardiochirurgicznego [8, 9]. Zapisanie parametrów danego czujnika drgań w pamięci TEDS znacznie ułatwiłoby konfigurację systemu pomiarowego. Widok stanowiska badawczego i jego schemat pokazano na rys. 8

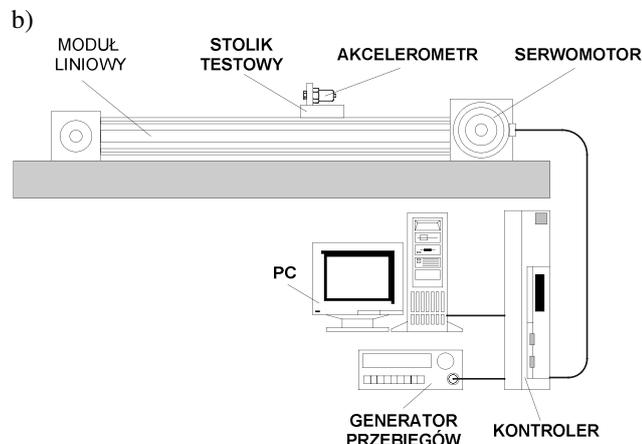
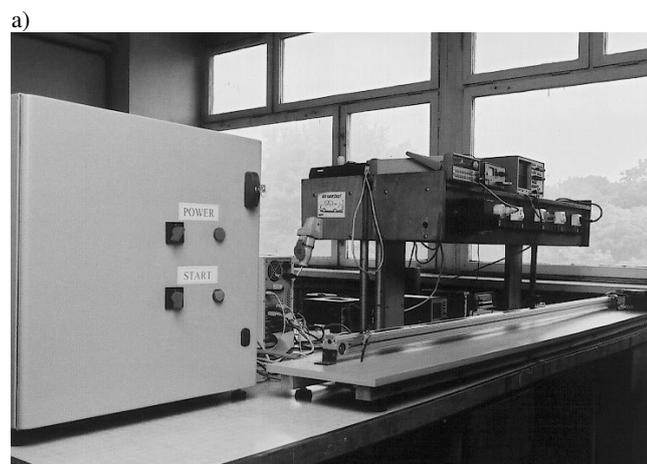


Rys. 8. Stanowisko do wzorcowania czujników przyspieszenia: a) widok, b) schemat  
Fig. 8. Calibration setup for acceleration sensors: a) view, b) scheme

Kolejny z prowadzonych projektów ma na celu wprowadzenie komunikacji bezprzewodowej w oparciu o protokół ZigBee (jeden z protokołów proponowanych w opracowywanej normie IEEE P1451.5) na stanowisku do wzorcowania czujników drgań w zakresie niskich częstotliwości. W latach 2001/2002 zbudowano stanowisko, które w założeniach miało umożliwić wzorcowanie czujników przyspieszenia w zakresie częstotliwości od około 0.1 Hz do 10 Hz [10]. Widok i schemat stanowiska

pokazano na rys.9. Stanowisko składa się z modułu liniowego DGE-25-2000 firmy FESTO, na którym umieszczony jest ruchomy stolik testowy. Do stolika mocuje się badane akcelerometry. Ruch stolika kontrolowany jest przez dedykowany sterownik.

Ze względu na duży zakres amplitudy przemieszczenia, pożądana jest bezprzewodowa transmisja sygnału od czujnika do systemu akwizycji danych. Można wykorzystać do tego celu proste rozwiązania bazujące na transmisji radiowej ASK o częstotliwości 433.92 MHz. Problem okablowania nie jest jednak krytyczny, a chcąc „trzymać rękę na pulsie”, postanowiono zaimplementować rozwiązania proponowane w przygotowywanej normie IEEE P1451.5, godząc się na dłuższy czas realizacji takiego projektu.



Rys. 9. Stanowisko do wzorcowania czujników przyspieszenia w zakresie niskich częstotliwości: a) widok, b) schemat.  
Fig. 9. Low frequency calibration setup for acceleration sensors: a) view, b) scheme

Ponieważ we wcześniejszych rozdziałach nie wspomniano nic o protokole ZigBee, w dalszej części zamieszczono kilka zdań wyjaśnienia. Sporo uwagi poświęcono temu protokołowi w [11].

Protokół ZigBee powstał z myślą o sieciach bezprzewodowych czujników i aktuatorów, przy założeniu niskiego poboru energii elektrycznej, a rozwijany jest przez ZigBee Alliance [12]. Obok tego protokołu, norma IEEE P1451.5 przewiduje wykorzystanie dwóch innych protokołów sieci bezprzewodowych – WiFi oraz Bluetooth. W porównaniu do tych dwóch protokołów, ZigBee charakteryzuje się przede wszystkim bardzo małym zapotrzebowaniem na energię, co wynika z faktu, że urządzenie bazujące na ZigBee w 99% czasu pozostaje w stanie uśpienia oraz znaczną liczbą węzłów sieciowych. Krótkie porównanie wyżej wymienionych protokołów zawarto w tab. 2.

W pracach własnych jako zestawy uruchomieniowe wykorzystuje się układy PICDEM.Z firmy Microchip. Docelowy układ będzie konstrukcją własną, dostosowaną do potrzeb stanowiska. Protokół zaimplementowany zostanie na procesorze 8 bitowym firmy Microchip, 18LF4620. Moduł radiowy 2,4 GHz, zawierający warstwę MAC został zakupiony jako gotowy układ.

Tab. 2. Porównanie protokołów transmisji bezprzewodowej proponowanych w normie IEEE P1451.5

Tab. 2. Comparison of the wireless protocols proposed in IEEE P1451.5 standard

	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Profil energetyczny	Godziny	Dni	Lata
Złożoność stosu	Bardzo złożony	Złożony	Prosty
Ilość węzłów	32	7	65535
Zasięg	100 m	10 m	70 – 300 m
Przepustowość	11 Mbps	1 Mbps	250 Kbps

## 5. Literatura

- [1] IEEE Std 1451.1-1999, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model. IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, 2000 (norma zatwierdzona 26 czerwca 1999).
- [2] IEEE Std 1451.2-1997, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY 1998 (norma zatwierdzona 16 września 1997).
- [3] IEEE Std 1451.3-2003, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Actuators—Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems. IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, 2004 (norma zatwierdzona 11 września 2003).
- [4] IEEE Std 1451.4-2004, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats. IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY 2004 (norma zatwierdzona 25 marca 2004).
- [5] Lee K.: Synopsis of IEEE 1451. Empowering the Smart Sensor Revolution. Sensors Conference / Expo 2005, Chicago, IL, 7 czerwca 2005. Prezentacja dostępna na <http://ieee1451.nist.gov/>.
- [6] Ulivieri N., Distanti C., (i inni): IEEE1451.4: A way to standardize gas sensor. Sensors and Actuators B 114 (2006), 141-151.
- [7] Buchcik D., Wyżgolik R., Pietraszek S.: Comparative study of acceleration transducers for biomedical applications, Proceedings of SPIE - Vol. 6348.
- [8] Pietraszek S.: Zastosowanie monolitycznych czujników przyspieszenia i żyroskopów do wspomagania diagnostyki układu motorycznego pacjenta, COE 2004, Wrocław, 2004, s. 635-638.
- [9] Pietraszek S., Kostka P., Nawrat Z.: Badania ruchu robota kardiochirurgicznego z wykorzystaniem monolitycznych czujników przyspieszenia i żyroskopów, COE 2004, Wrocław, 2004, s. 639-642
- [10] Buchcik D., Wyżgolik R.: Low frequency acceleration calibrator based on linear displacement unit, Eurosensors XVI, Prague, 2002, paper No. MP68, s. 163-164
- [11] Michta E.: Tendencje rozwojowe w obszarze systemów pomiarowo-sterujących, PAK 6/2006, s. 5-7
- [12] ZigBee Specification. ZigBee Alliance, June 2005