

Kamil MAŚLANKA<sup>1</sup>, Patryk RĘKAWEK<sup>2</sup>, Jarosław JANUSZ<sup>3</sup>, Jacek KŁOSIŃSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ARNAP SP. Z O.O., ul. Strażacka 35, 43-382 Bielsko-Biała

<sup>2</sup>AF SEKO SP. Z O.O., ul. Bogusławskiego 17, 43-300 Bielsko-Biała

<sup>3</sup>AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA W BIELSKU-BIAŁEJ, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

## Urządzenia pomiarowe wykorzystywane w dydaktycznych stanowiskach laboratoryjnych

Inż. Kamil MAŚLANKA

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno - Humanistycznej w Bielsku Białej. Obronił pracę inżynierską na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalność Systemy Mechatroniczne. Automatyk sterowania przepływem i procesami przemysłowymi w dziedzinie Gas&Oil. Zajmuje się teorią sterowania, układami automatycznej regulacji wraz z programowaniem algorytmów i procesami przemysłowymi.



e-mail: maslanka.kam@gmail.com

Inż. Patryk RĘKAWEK

Ukończył studia na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalność Systemy Mechatroniczne na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Automatyk, programista. Zajmuje się sterowaniem procesów przemysłowych przy wykorzystaniu układów mikroprocesorowych i sterowników swobodnie programowalnych.



e-mail: patryk.rekawek@gmail.com

Dr inż. Jarosław JANUSZ

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej. Pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Podstaw Budowy Maszyn. Obronił pracę doktorską na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z dynamiką i sterowaniem maszyn roboczych.



e-mail: jjanusz@ath.bielsko.pl

Dr hab. inż. Jacek KŁOSIŃSKI

Ukończył studia na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obronił pracę doktorską na tym samym wydziale a kolokwium habilitacyjne złożył przed Radą Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku Białej. Zajmuje się zagadnieniami dynamiki i sterowaniem maszyn oraz automatyką procesów przemysłowych.



e-mail: jklosinski@ath.bielsko.pl

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano urządzenia pomiarowe zainstalowane w dwu stanowiskach do badania zachowania wybranych układów regulacji położenia. Są to: stanowisko wahadła odwróconego umieszczonego na ruchomej platformie poruszającej się po poziomych prowadnicach oraz stanowisko równoważni utrzymującej kulkę w wybranej pozycji na prowadnicach, które mogą wykonywać ruch obrotowy względem osi poziomej. Obydwa obiekty regulacji są strukturalnie niestabilne i wymagają doboru regulatorów o odpowiednio dobranych nastawach. Stanowiska wykonano i przetestowano. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w trakcie testów stanowisk przedstawiono w postaci charakterystyk czasowych, również zamieszczono zauważone uwagi eksploatacyjne. Poza tym w pracy umieszczono również schemat układu elektrycznego enkodera oraz okna programu wizualizacyjnego obsługującego układy regulacji przemieszczenia w stanowiskach. Stanowiska były prezentowane na kilku prestiżowych prezentacjach i konkursach ciesząc się dużym zainteresowaniem i bardzo dobrą oceną komisji konkursowych. Mogą być wykorzystane zarówno w działalności dydaktycznej jak i pracach naukowych dotyczących sterowania obiektami strukturalnie niestabilnymi.

**Słowa kluczowe:** pomiar położenia, wahadło odwrócone, enkoder obrotowy, czujnik odbiciowy.

### Measuring devices used in didactic stands

#### Abstract

The measuring devices used in two stands for testing selected displacement control systems are described in the paper. The stands are: the stand of inverted pendulum located on a movable platform – the platform can move on horizontal guides, and the stand with a balancing beam ensuring the stabilization of the ball in a selected position on rail guides – the beam can rotate in regard to the horizontal axis. Both controlled objects are structurally unstable and require the use of controllers with specially selected parameters. The stands have been built and tested. The results of experimental tests shown in the form of time characteristics as well as the remarks concerning stands exploitation of the stands are presented. Moreover, the electric scheme of the encoder system and the computer interface windows of the monitoring programs used for controlling the displacement control systems are contained in the paper. The stands were presented on several prestigious presentations and competitions with a very good estimate of the competitive

commission. They can be used in didactic activity as well as in research works concerning control of structurally instable objects.

**Keywords:** displacement measurements, inverted pendulum, rotary encoder, proximity switch, control systems.

### 1. Wstęp

Urządzenia pomiarowe w układach regulacji służą do pomiaru sygnałów wyjściowych obiektu regulacji i przekazywania ich wartości do regulatorów. Z tego powodu skuteczność ich działania, dokładność, szybkość pomiaru i przetwarzanie sygnałów odgrywają istotną rolę w jakości działania układów regulacji. Zagadnienia te postanowiono sprawdzić w stanowiskach laboratoryjnych służących prezentacji stabilizacji pracy obiektów strukturalnie niestabilnych [2, 3], przy wykorzystaniu regulatorów o odpowiednio dobranych nastawach [1]. Szczególnie jest to istotne wobec nieliniowości obiektów [4] oraz stosunkowo prostych elementów wykonawczych zastosowanych w układach regulacji.

### 2. Stanowisko wahadła odwróconego umieszczonego na ruchomej platformie

Wahadło odwrócone (rys. 1) umieszczono na ruchomej platformie poruszającej się suwliwie po prostoliniowych poziomych prętach. Napęd platformy realizowany jest za pomocą silnika prądu stałego sterowanego mikroprocesorowo poprzez zębatą przekładnię pasową (rys. 2). Zadaniem układu regulacji jest utrzymanie w stanie ustalonym wahadła odwróconego w pozycji pionowej w ściśle określonym położeniu platformy niezależnie od występujących zakłóceń.

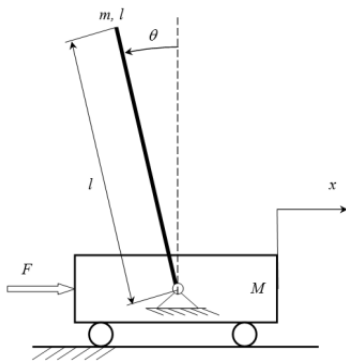
Układ sterowania wykonano na platformie mikroprocesorowej Arduino.

Do pomiaru położenia platformy w poziomie użyto enkodera obrotowego umieszczonego na osi jednego z kół przekładni pasowej. Zastosowany enkoder obrotowy z drukarki igłowej współpracuje z tarczą szczelinową o rozdzielczości 144 otwory na obrót.

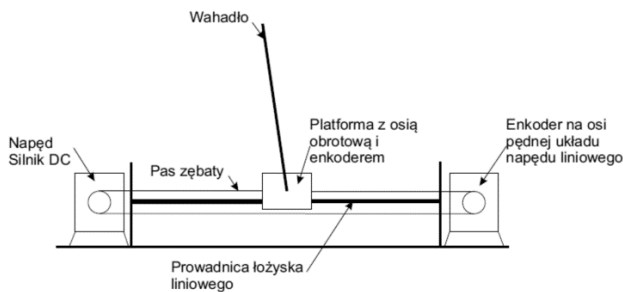
Enkoder o takiej rozdzielczości podłączony na detekcję zbocza na jednym kanale daje rozdzielczość 288 punktów na obrót. Przy zastosowaniu koła pasowego o średnicy  $d=31$  mm współpracującego z pasem zębatym daje to dokładność pozycjonowania platformy wahadła do 0.34 mm.

$$i_p = \frac{\pi \cdot d}{288} = \frac{\pi \cdot 31}{288} \approx 0,34 \text{ mm}$$

Enkoder ten jest zgodny ze standardem TTL 0-5 V.

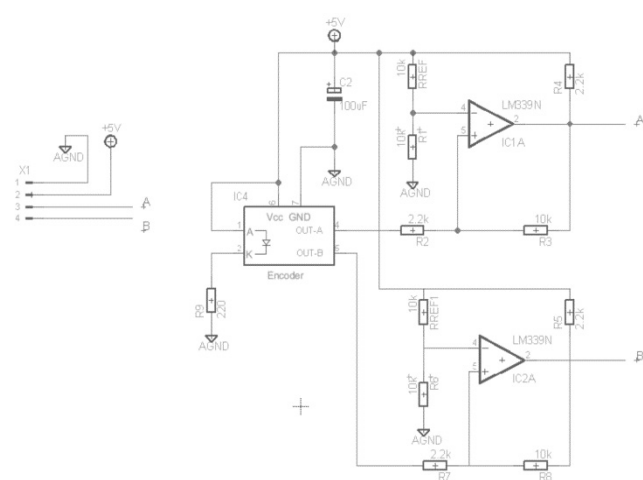


Rys. 1. Schemat wahadła odwróconego na ruchomej platformie  
Fig. 1. Scheme of the inverted pendulum located on a movable platform



Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska wahadła odwróconego  
Fig. 2. Scheme of the inverted pendulum stand

Do pomiaru kąta odchylenia wahadła od pionu zastosowano enkoder z tarczą szczelinowo-graficzną o rozdzielczości 1800 punktów na obrót zamocowaną na osi wahadła odwróconego. Zastosowany enkoder na wyjściu ma sygnał sinusoidalny o amplitudzie około 1V i wartości średniej równej połowie zasilania 2.5 V.

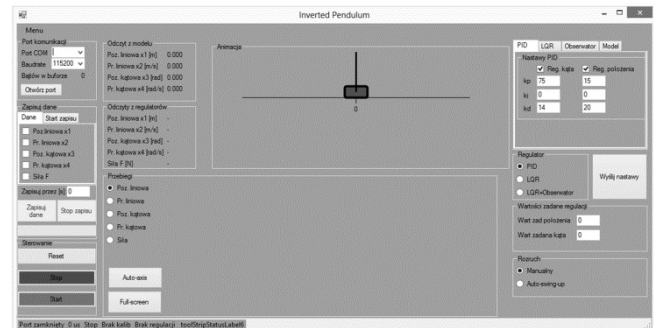


Rys. 3. Schemat elektryczny enkodera osi obrotowej wahadła  
Fig. 3. Electric scheme of the pendulum encoder

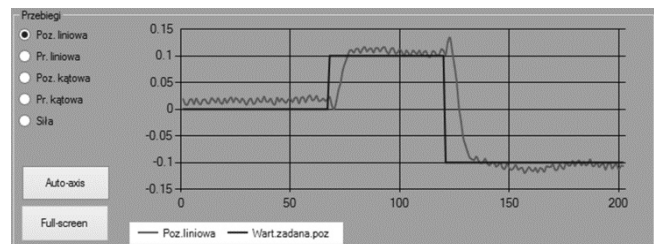
Konieczna jest zamiana sygnału sinusoidalnego na sygnał prostokątny w standardzie TTL. W tym celu zastosowano komparator analogowy z histerezą aby wyeliminować zakłócenia sygnału w trakcie zmiany stanu L/H oraz H/L. Układ komparatora skonfigurowano jako komparator nieodwracający z histerezą (rys. 3).

Oba enkodery podłączono w układ detekcji zbocza opadającego i narastającego na jednym kanale.

Sygnały z enkoderów oprócz wykorzystania w układzie regulacji są przesyłane do specjalnie napisanego programu wizualizacyjnego wyświetlanego na monitorze komputera. (rys. 4, rys. 5).

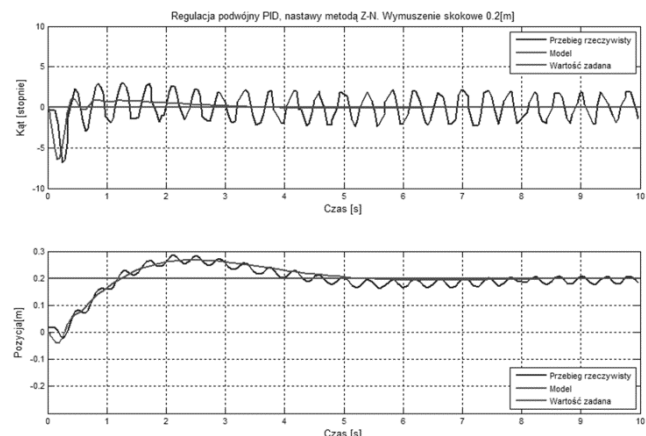


Rys. 4. Główne okno użytkownika programu  
Fig. 4. Main window of the user program

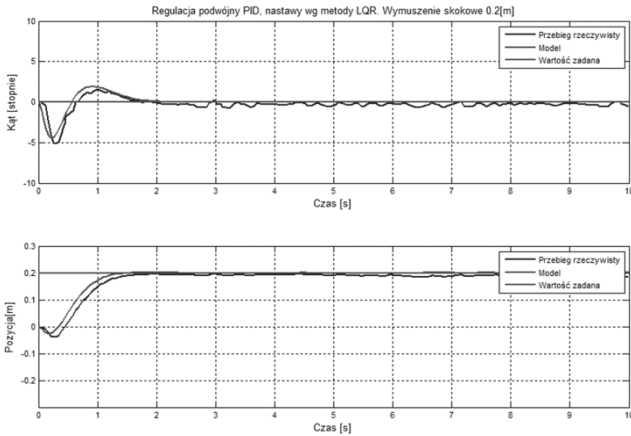


Rys. 5. Obszar wykresów w programie użytkownika  
Fig. 5. Diagrams shown in the user program

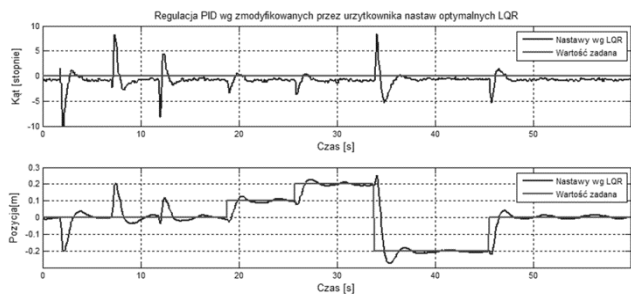
W układzie regulacji zastosowano regulatory: modalny o nastawach dobranych metodą lokowania pierwiastków transmitancji zlinearyzowanego układu w określonych punktach, LQR i podwójny PID. Wybrane przebiegi sygnałów pomiarowych uzyskanych z enkoderów w trakcie skokowych wymuszeń przedstawiono na rys. 6 i rys. 7, a dla wprowadzania losowych zakłóceń zamieszczono na rys. 8.



Rys. 6. Regulacja z podwójnym regulatorem PID z nastawami wg metody Zieglera-Nicholsa. Wymuszenie skokowe pozycji platformy  $x=0,2 \cdot 1(t)$  m  
Fig. 6. Diagrams: angle of the pendulum vs. time and displacement of the platform vs. time. Control with a double PID controller, settings of the controller according to the Ziegler-Nichols formulae, step input  $x=0,2 \cdot 1(t)$  m



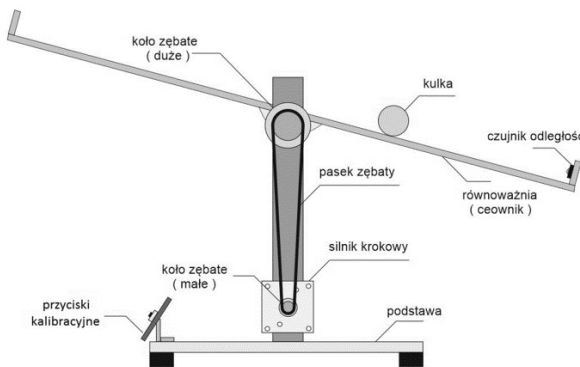
Rys. 7. Regulacja z podwójnym regulatorem PID z nastawami wg metody optymalnej LQR. Wymuszenie skokowe pozycji platformy  $x=0,2 \cdot I(t)$  m  
 Fig. 7. Control with a double PID controller, settings of the controller according to the LQR formulae, step input  $x=0,2 \cdot I(t)$  m



Rys. 8. Prezentacja pracy modelu fizycznego wahań odwróconego z regulacją PID i zmodyfikowanymi nastawami optymalnymi LQR. Wymuszenia skokowe i próby wytrącenia z równowagi  
 Fig. 8. Presentation of the physical model of the inverted pendulum with PID control and the LQR controller in which the modified settings are applied. The response of the system to a random input is presented

### 3. Stanowisko równoważni z kulką

Równoważnia z kulką (rys. 9) składa się z: podstawy, belki równoważni z kulką, silnika krokowego z zębatą przekładnią pasową, przycisków kalibracyjnych i odbiciowego czujnika odległości. Sterowanie stanowiskiem zaimplementowano na platformie mikroprocesorowej Arduino.

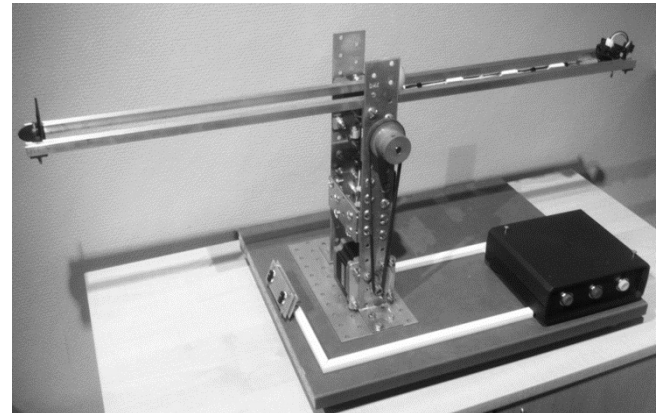


Rys. 9. Schemat stanowiska laboratoryjnego równoważni z kulką  
 Fig. 9. Scheme of the stand with a balancing beam with a ball

Zadaniem układu regulacji jest zapewnienie utrzymania w stanie ustalonym kulki na równoważni w ściśle określonym położeniu niezależnie od występujących zakłóceń. Do pomiaru położenia kulki na równoważni wykorzystano optyczny czujnik odległości Sharp - GP2Y0A21YK0F. Czujnik ten posiada nieliniową charakterystykę statyczną.

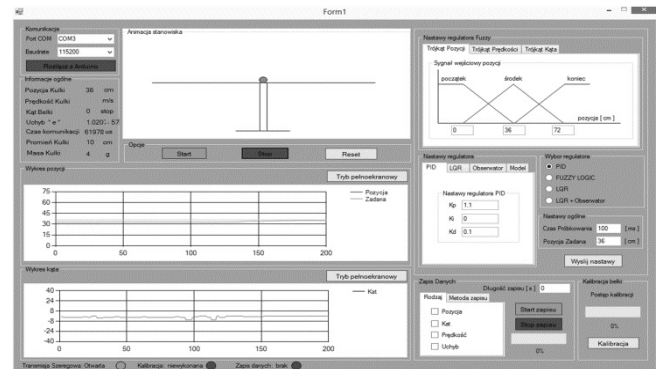
Dokładność czujnika wynikająca z dokumentacji wynosi  $\pm 3$  mm i jest uzależniona od:

- koloru obiektu, który ma zostać wykryty przez czujnik,
  - materiału, z jakiego wykonany jest obiekt,
  - kształtu obiektu: w przypadku rozpatrywanego stanowiska elementem pomiarowym jest kulka, przez co wiązka podczerwieni odbija się w sposób rozproszony,
  - kierunku poruszania obiektu.
- Zbudowane stanowisko przedstawiono na rys. 10.



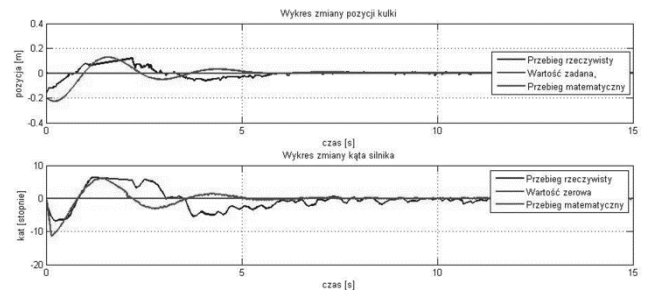
Rys. 10. Widok stanowiska równoważni z kulką  
 Fig. 10. View of the stand with the balancing beam

Do obsługi stanowiska równoważni napisano aplikację w środowisku Microsoft Visual Studio 2012. Na rys. 11 pokazano interfejs do obsługi pracy układu.



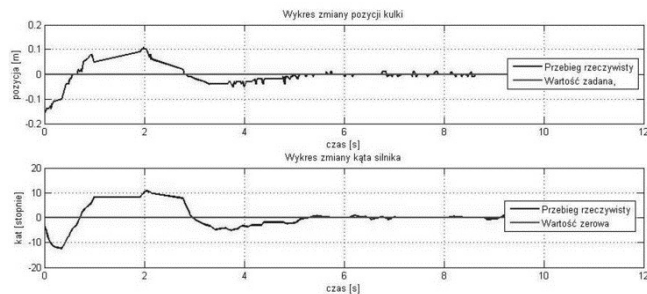
Rys. 11. Główne okno programu obsługującego stanowisko równoważni z kulką  
 Fig. 11. Main window in the program used for control of the stand

W układzie regulacji jest możliwość wykorzystania regulatora PID, Fuzzy Logic oraz LQR. Wybrane przebiegi sygnału pomiarowego uzyskanego w trakcie pracy układu równoważni z kulką przedstawiono na rys. 12 - 14.



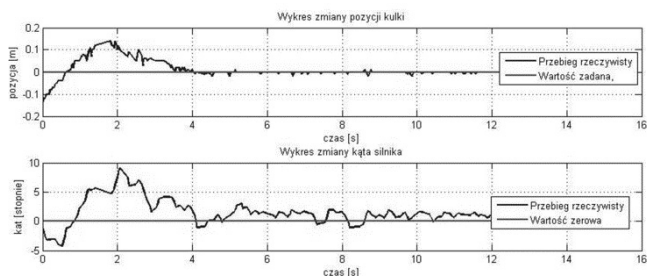
Rys. 12. Porównanie zarejestrowanej pozycji kulki i kąta pochylenia równoważni z obliczoną w modelu matematycznym dla nastaw regulatora PID ( $k_p=0,8, k_i=0,1, k_d=0,17$ )

Fig. 12. Displacement of the ball and the angle of inclination of the beam vs. time diagrams. Comparison of the recorded and calculated diagrams for selected PID controller settings:  $k_p=0,8, k_i=0,1, k_d=0,17$



Rys. 13. Zarejestrowana pozycji kulki i kąta pochylenia równoważni dla nastaw regulatora PID ( $k_p=1.1$ ,  $k_i=0$ ,  $k_d=0.19$ )

Fig. 13. Recorded position of the ball and the angle of inclination of the beam for the following controller settings  $k_p=1.1$ ,  $k_i=0$ ,  $k_d=0.19$



Rys. 14. Zarejestrowana pozycji kulki i kąta pochylenia równoważni dla nastaw regulatora PID ( $k_p=0.6$ ,  $k_i=0.1$ ,  $k_d=0.19$ )

Fig. 14. Recorded position of the ball and the angle of inclination of the beam for the following controller settings  $k_p=0.6$ ,  $k_i=0.1$ ,  $k_d=0.19$

## 4. Podsumowanie

Obydwa stanowiska laboratoryjne zostały wykonane z myślą o sprawdzaniu wpływu nastaw regulatorów na zachowanie się obiektów strukturalnie niestabilnych. Stąd istotną rolę odgrywają:

szybkość działania i dokładność urządzeń pomiarowych. W pracy stanowiska wahadła odwróconego szczególną uwagę zwracano na rozdzielczość enkoderów i zapewnienie prawidłowej pracy układu napędowego. W celu wyeliminowania zakłóceń elektromagnetycznych na liniach sygnałowych enkoderów zastosowano przewody ekranowane. W drugim stanowisku pewnym utrudnieniem pracy czujnika optycznego było rozpraszenie przez obracającą się kulkę umieszczoną na równoważni wiązki światła emitowanego przez czujnik oraz występujące zakłócenia elektromagnetyczne, które częściowo wyeliminowano przez ekranowane przewody i zastosowanie koralika ferrytowego na przewodach sygnałowych czujnika. Zastosowane czujniki spełniły wymagania jakie im postawiono.

## 5. Literatura

- [1] Wende Li, Hui Ding, Kai Cheng: An investigation on the de-sign and performance assessment of double-PID and LQR controllers for the inverted pendulum. Control, 2012 UKACC International Conference. p. 190-196
- [2] Amjad, M., Kashif, M.I., Abdullah, S.S., Shareef, Z.: A simplified intelligent controller for ball and beam system. Education Technology and Computer (ICETC), 2010 2nd International Conference. Vol. 3. p. 494-498
- [3] Rapp, P., Sawodny, O., Tarin, C.: Stabilization of the ball and beam system by dynamic output feedback using incremental measurements Control Conference (ECC), 2013 European, p. 288-297.
- [4] Yong Xin, Jian Xu, Bo Xu, Hui Xin: The inverted-pendulum model with consideration of pendulum resistance and its LQR controller. Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference. Vol. 7. p. 3438-3441.

otrzymano / received: 04.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.