

Mikrokomputerowy system do pomiaru impedancji

Piotr Ostrogórski, Grzegorz Rogoń

Koło Naukowe ECART, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Streszczenie: Artykuł prezentuje prototyp przyrządu do pomiaru impedancji, jego zalety i wady. Omówiona jest metoda pomiaru i jej realizacja. W punkcie 1 znajduje się opis części strukturalnej przyrządu. Następnie omawiana jest idea pomiaru z wykorzystaniem trzech woltomierzy wraz z analitycznym wyprowadzeniem wzorów. W dalszej części przedstawiany jest szczegółowo sposób realizacji algorytmicznej pomiaru - część funkcjonalna. Podzielono treść punktu 3 na sześć akapitów, z których każdy dotyczy kolejnego etapu przetwarzania sygnałów wejściowych aż do otrzymania wyniku. Punkt 4 poświęcony jest określeniu zakresów zmienności parametrów obiektów wejściowych i wyznaczeniu dokładności przyrządu pomiarowego. W punkcie 5 mowa o usprawnieniach systemu pomiarowego. Autorzy przedstawiają kilka propozycji, które można zrealizować, aby zwiększyć dokładność przyrządu i uniezależnić od przyrządów zewnętrznych.

Słowa kluczowe: pomiar, impedancja, metoda trzech woltomierzy, system pomiarowy, współczynnik zawartości harmonicznych, szybka transformata Fouriera

Opisany w pracy mikrokomputerowy system do pomiaru impedancji jest prototypem wykonanym w ramach projektu realizowanego w kole naukowym ECART w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Wśród przyrządów pomiarowych do pomiaru impedancji należy wyszczególnić mierniki RLC - przyrządy te mierzą impedancję, jednak przedstawiają ją rozłożoną na poszczególne elementy biernie posługując się schematem zastępczym badanego obiektu. Użytkownik decyduje o wyborze schematu zastępczego równoległego bądź szeregowego. Znaczącą grupą są przyrządy pomiarowe tzw. ultramobilne, wielofunkcyjne i jednocześnie przenośne. Na rynku przyrządów laboratoryjnych tego typu występują przyrządy specjalistyczne jak np. analizatory impedancji. Ich funkcjonalność znacznie wykracza poza zwykły pomiar impedancji. Pozwalają one na analizę częstotliwościową i są często wykorzystywane w badaniu materiałów jak również w medycynie (spektroskopia impedancyjna).

Autorzy proponują system pomiarowy bogaty funkcjonalnie, oparty na popularnym systemie operacyjnym, mogący pracować wielowątkowo i przechowywać miliony danych pomiarowych. Niewielkie gabaryty i przenośność sprawia, że ten system pomiarowy może być doraźnie używany lub też może służyć jako część większego systemu np. przy produkcji elementów elektronicznych biernych. Możliwość połączenia w sieć Ethernet, wbudowane porty RS-232 i porty USB ułatwiają komunikację z systemem pomiarowym i pozwalają na przenoszenie danych. Całość

tego przyrządu została zamknięta w aluminiowej obudowie. Wewnątrz znajduje się komputer przemysłowy wraz z zasilaczem, dyskiem twardym i kartą pomiarową.

Podstawowym założeniem konstrukcyjnym jest pomiar bazujący na metodzie trzech woltomierzy. Choć metoda pomiaru pamięta jeszcze początki XX wieku, nie jest pod żadnym względem to przestarzały pomysł. Coraz większy napływ przyrządów pomiarowych tego typu na rynku potwierdza te słowa. Dawna metoda trzech woltomierzy wymagała ich trzech - możliwa była również realizacja z jednym woltomierzem o przełączanych zaciskach. Nowoczesna, realizowana przez nas metoda polega na wykorzystaniu karty pomiarowej z przetwornikiem analogowo-cyfrowym i zastosowaniu cyfrowych algorytmów pomiarowych.

Prototyp jest wykonywany przez studentów Piotra Ostrogórskiego i Grzegorza Rogonia w ramach projektu naukowego. Opiekunem projektu i promotorem pracy magisterskiej jest dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. n. AGH.

1. Opis działania

Podstawą przyrządu pomiarowego jest płyta przemysłowa PCM-9371 firmy Advantech, do której jest podłączona karta przetwornika analogowo-cyfrowego PCM-3718HG. Zgodnie z założoną metodą pomiaru dokonywany jest pomiar trzech sygnałów wejściowych (sygnał zasilania, sygnał rezystancji wzorcowej, sygnał badanego obiektu). Następnie sygnały te podlegają obróbce mającej na celu określenie podstawowych parametrów tych przebiegów takich jak: wartość średnia, częstotliwość, amplituda, przesunięcie fazowe. Wyznaczenie tych parametrów dla każdego sygnału z osobna pozwala na zastosowanie ich w metodzie trzech woltomierzy oraz wyliczenia impedancji nieznanego obiektu. Pamiętać należy, iż metoda ta wymaga, aby sygnały mierzone były przebiegami sinusoidalnymi, dlatego też zaimplementowano algorytm FFT (Fast Fourier Transform) w celu oceny, czy sygnał jest rzeczywiście sinusoidą (ewentualnie jej przybliżeniem). Program do pomiaru wyposażony został w szereg funkcji ułatwiających jego obsługę: proste GUI, możliwość zapisu danych do pliku, rejestrowanie błędów podczas działania programu, komunikaty informujące użytkownika o wykonywanych aktualnie czynnościach.

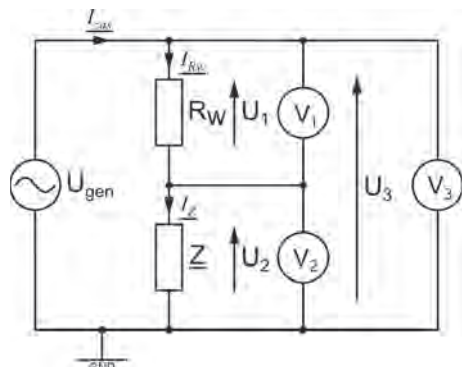
2. Metoda trzech woltomierzy

Metoda trzech woltomierzy jest jedną z metod pomiaru impedancji. Polega ona na pomiarze trzech napięć:

- napięcia na obiekcie pomiarowym
- napięcia na rezystorze wzorcowym

– napięcia zasilania, czyli napięcia na zaciskach dwójnika wykonanego z połączenia szeregowego rezystora wzorcowego i obiektu pomiarowego.

Na podstawie tych trzech napięć można wnioskować o impedancji obiektu [4]. Można w obliczeniach wykorzystywać zamienne wartości skuteczne albo maksymalne napięć.



Rys. 1. Schemat obrazujący ideę metody
Fig. 1. Method schematic diagram



Rys. 2. Wykres wskazowy napięć
Fig. 2. Voltages vector diagram

Poniżej zamieszczono szczegółowe, analityczne wyprowadzenie wzorów na metodę trzech woltmierz [4]. Nie biorąc pod uwagę skończonej rezystancji woltmierz można napisać stosując prawo Ohma [1] dla rezystancji wzorcowej:

$$U_1 = R_w \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{U_1}{R_w} \quad (1)$$

Analogicznie dla modułu impedancji zespolonej:

$$U_2 = Z \cdot I \Leftrightarrow Z = \frac{U_2 \cdot R_w}{U_1} \quad (2)$$

Dla trójkąta prostokątnego utworzonego z rezystancji i reaktancji (rys. 2) obiektu obowiązuje zależność:

$$U_2^2 = U_R^2 + U_X^2 \quad (3)$$

Analogiczna zależność obowiązuje dla trójkąta, którego przeciwprostokątną jest U_3

$$U_3^2 = (U_1 + U_R)^2 + U_X^2 \quad (4)$$

Po przekształceniu równania 4

$$U_3^2 = U_1^2 + 2U_R U_1 + U_R^2 + U_X^2 \quad (5)$$

Wstawienie równania 3 do 4

$$U_3^2 = U_1^2 + 2U_R U_1 + U_2^2 \quad (6)$$

$$U_R = \frac{U_3^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1} \quad (7)$$

Wzór ostateczny na R :

$$R = \frac{(U_3^2 - U_1^2 - U_2^2)R_w}{2U_1^2} \quad (8)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Wzór ostateczny na X :

$$X = \sqrt{\left(\frac{U_2 \cdot R_w}{U_1}\right)^2 - \left(\frac{(U_3^2 - U_1^2 - U_2^2)R_w}{2U_1^2}\right)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U_2} = \frac{R}{Z} = \frac{(U_3^2 - U_1^2 - U_2^2) \cdot R_w \cdot U_1}{2U_1^2 U_2 R_w} \quad (9)$$

Wzór ostateczny na $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = \frac{U_3^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1 U_2}$$

Wykorzystując omawianą metodę otrzymuje się: rezystancję obiektu R , reaktancję obiektu X i kosinus kąta przesunięcia fazowego $\cos \varphi$. Stosując funkcje cyklotometryczne możemy uzyskać kąt przesunięcia fazowego $\varphi = \arccos(\cos \varphi)$.

Wyznaczając impedancję wystarczy wyliczyć tylko rezystancję i reaktancję obiektu, a można pominąć liczenie kąta fazowego.

3. Realizacja algorytmu

- 1) Próbkowanie - System pomiarowy gromadzi próbki w pamięci przy użyciu karty pomiarowej. Na tym etapie ważne jest spełnianie twierdzenia o próbkowaniu [3], które mówi: częstotliwość próbkowania musi być co najmniej dwukrotnie większa od największej częstotliwości zawartej w sygnale. Częstotliwość próbkowania systemu pomiarowego wynosi 30 kHz. Największa częstotliwość sygnału może wynosić do 5000 Hz. Dopuszczalny jest jedynie sygnał sinusoidalnie zmienny. Na przykład dla sygnału zasilającego o częstotliwości 1000 Hz system pomiarowy przechowa w pamięci ponad 400 okresów dla każdego z woltmierz i wykona na nich obliczenia.
- 2) Pomiar częstotliwości - zaimplementowano dwie metody pomiaru częstotliwości. Pierwszą z nich jest pomiar poprzez zliczenie półokresów. Odszukiwane jest pierwsze i ostatnie miejsce zerowe funkcji sinus umieszczonej w buforze. Następnie jest zawężany przedział poszukiwania miejsc zerowych i zliczana ilość próbek w tym przedziale. Kolejnym krokiem jest zliczenie ilości pozostałych miejsc zerowych. Otrzymuje się ilość próbek na pół okresu funkcji. Znając częstotliwość próbkowania systemu otrzymuje się ostatecznie częstotliwość sygnału. Drugą metodą jest wyznaczenie FFT, następnie interpolacja wielomianem drugiego rzędu (parabolą). Współrzędna osi argumentu wierzchołka paraboli to jest szukaną częstotliwością. W systemie pomiarowym zaimplementowano zoptymalizowany pod względem szybkości obliczeniowej algorytm RADIX-2 [2]. Wyznaczona częstotliwość sygnału jest odwracana, aby w efekcie otrzymać poszukiwany okres.

- 3) Określenie wartości skutecznych każdego z napięć. Wartość skuteczna obliczana jest zgodnie ze wzorem definicyjnym:

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

Zastosowano metodę trapezów do numerycznego całkowania. Całkowanie odbywa się po możliwie największej ilości okresów umieszczonej w buforze.

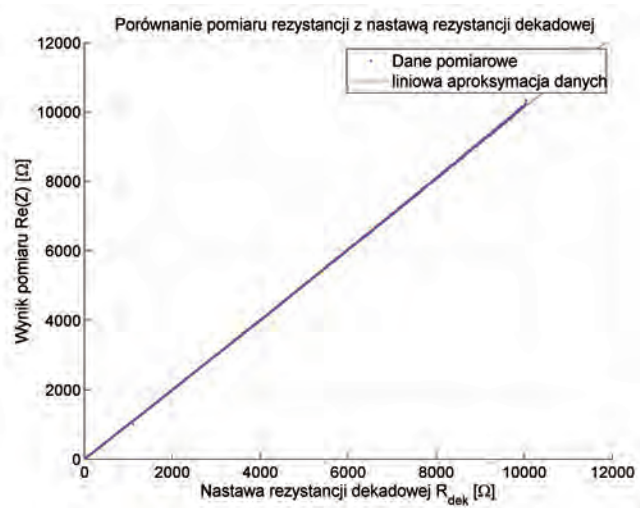
- 4) Obliczenie rezystancji i reaktancji obiektu. Uzyskujemy impedancję zespoloną obiektu. Wynikiem obliczeń jest też kąt przesunięcia fazowego. Ze stosunku części rzeczywistej impedancji do części urojonej otrzymujemy jest kosinus kąta przesunięcia fazowego $\cos \varphi$. Po użyciu funkcji cyklometrycznej $\arccos(\cos \varphi) = \varphi$ otrzymujemy poszukiwany kąt.
- 5) Archiwizacja wyników obliczeń w celu: analizy statystycznej, rachunku błędów pomiarowych i zobrazowania wyników.
- 6) Określenie charakteru impedancji na podstawie znaku części urojonej impedancji zespolonej. Można zakładać znajomość charakteru impedancji obiektu przez mierzącego lub identyfikować charakter impedancji: stosując układy zewnętrzne, bądź analizując zachowanie wyższych harmonicznych sygnałów wejściowych.

4. Określenie zakresów pomiarów

- Zakres częstotliwości sygnału zasilającego. System pomiarowy pobiera 4096 próbek na kanał przy częstotliwości próbkowania 10 kHz na jeden kanał. Najdłuższe pół okresu mieszczące się w buforze wynosi $\frac{1}{2} \cdot 4096 \cdot 10^{-5} = 0.02048$ s. Częstotliwość minimalna to 12.2 Hz. Częstotliwość maksymalna to 5000 Hz zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu.
- Zakres napięć wejściowych. Ze względu na ograniczenia karty pomiarowej, co do amplitudy napięcia wejściowego, napięcia muszą należeć do przedziału ± 5 V wartości maksymalnej, czyli 3.535 V wartości skutecznej.
- Zakres rezystancji obiektów mierzonych wraz z określonymi wartościami błędów maksymalnego dla każdego z przedziałów.
 - $70 \Omega - 4400 \Omega < 0.6 \%$
 - $30 \Omega - 6200 \Omega < 1.1 \%$
 - $10 \Omega - 9800 \Omega < 2 \%$
 - $10 \Omega - 23 \text{ k}\Omega < 5 \%$

Wartości zakresów są określone na podstawie analizy działania. Wartości rezystancji zmierzone omawianym przyrządem zostały odniesione do wartości wzorcowych. Jako wartości wzorcowe uznano nastawę rezystancji dekadowej po uprzednim wykonaniu pomiarów tej rezystancji innym, dokładniejszym przyrządem i stwierdzeniu, że dokładność nastaw jest zgodna z opisem na obudowie. Dokonano, więc uprzedniego wzorcowania rezystancji dekadowej.

Ustalono w pierwszej kolejności progi niepewności pomiarowych. Zakresy pomiarowe zostały ustalone po wyborze niepewności.



Rys. 3. Pomiar rezystancji

Fig. 3. Resistance measurement

Tab. 1. Wyniki pomiarów wraz z wyznaczeniem niepewności w zakresie 10-100 Ω

Tab. 1. Results of resistance measurements with computed uncertainty in range 10-100 Ω

R_{zad} [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	δR [%]
10	10.129	1.548	1.2900
20	19.832	3.779	0.8400
30	30.307	2.587	1.0233
40	40.283	2.933	0.7075
50	49.941	5.063	0.1180
60	60.314	3.746	0.5233
70	69.901	6.586	0.1414
80	80.192	1.666	0.2400
90	90.017	6.084	0.0189
100	100.469	7.082	0.4690

Tabela 1 zawiera wyniki pomiarów i obliczeń w odniesieniu do wykresu (rys. 3).

- Pomiar indukcyjności został wykonany dla indukcyjności wzorcowej:

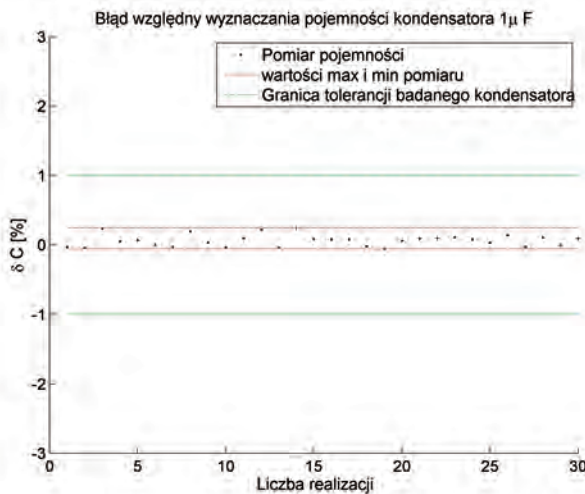
W odniesieniu do modelu szeregowego LR otrzymano z pomiarów miernikiem RLC:

$$- L = 100.01 \text{ mH}$$

$$- R = 36.542 \Omega$$

Z pomiarów wynika, że popełniany jest błąd systematyczny 3.2 % czyli zamiast otrzymać 100.01 mH otrzymano 96,7 mH. Natomiast odchylenie standardowe od wartości średniej jest bardzo małe i wynosi $2.8 \cdot 10^{-5}$. Możliwą przyczyną jest różnica w warunkach pomiarów: pomiaru odniesienia i pomiaru kontrolnego urządzenia. Także na pomiar indukcyjności ma duży wpływ obecność ferromagnetyków w pobliżu.

- Zakres pojemności obiektów mierzonych. Ograniczeniem metody jak i zakresu pojemności wejściowych w kierunku dużych pojemności jest brak możliwości pomiaru kondensatorów elektrolitycznych. Do tej pory największa pojemność poddana pomiarom wynosiła $1 \mu\text{F}$ i dla tej pojemności błąd względny procentowy jest mniejszy od 0.25 %.



Rys. 4. Pomiar pojemności
Fig. 4. Capacitance measurement

- Czas pojedynczego pomiaru wynosi 1.11 s łącznie z zapisem wyników.
- Napięcie zasilania systemu pomiarowego 230 V.

5. Usprawnienia systemu

5.1. Dynamiczna zmiana zakresów

Przetwornik umożliwi niezależne ustawienie zakresów pomiarowych dla każdego z kanałów. Dostosowanie zakresu pomiarowego do wielkości mierzonych powinno zwiększyć dokładność pomiaru napięcia chwilowego, co przekłada się na kolejne etapy algorytmu. W konsekwencji na wynik pomiaru. Powinno to również wpłynąć na poszerzenie możliwych wartości impedancji poddawanych pomiarowi. Wpłynie to również niekorzystnie - wydłużając czas pojedynczego pomiaru, co z kolei można skompensować poprzez optymalizację algorytmu pod względem szybkości działania.

Przykład:

Aktualnie jest wybrany stały zakres ± 5 V, czyli sygnał wejściowy może się zmieniać o 10 V. Rozdzielczość przetwornika wynosi $2^{12} = 4096$, jeżeli podzielimy zakres przez rozdzielczość otrzymamy wartość odpowiadającą 1 LSB, tak więc $\frac{10}{4096} = 0.00244$ V. Mierząc rezystor o wartości 29 k Ω na rezystorze wzorcowym będzie napięcie o wartości maksymalnej 0.166 V obarczone błędem wynikającym ze stałego zakresu ± 5 V i rozdzielczości o wartości 1.46 %. Zmniejszając zakres o połowę zmniejszy się też błąd o połowę. Dla zakresu ± 2.5 V ten błąd wyniesie 0.73 %. Jednak zakres ten można zmniejszyć nawet do 0.625 V i wtedy błąd będzie wynosił 0.18 %, co powinno przynieść radykalną poprawę dokładności szczególnie dla wartości impedancji znacznie różnych od 1000 Ω . Jest to wartość rezystora wzorcowego na stałe zintegrowanego z systemem pomiarowym.

5.2. Zmiana metody całkowania

Z metody trapezów używanej aktualnie do całkowania wynika, że kształt funkcji pomiędzy próbkami jest aprok-

symowany linią prostą, w przypadku funkcji $(A \cdot \sin 2\pi ft)^2$. Zastosowanie metody Simpsona może zmniejszyć błąd wyniku całkowania, ponieważ lepszym przybliżeniem kształtu funkcji sinus będzie wielomian drugiego rzędu niż linia prosta.

5.3. Pomiar THD

Spodziewanym przebiegiem sygnału wejściowego jest funkcja sinus. W praktyce jednak sygnał wejściowy posiada harmoniczne [3] jak również występuje w nim składowa szumu o nieznanym rozkładzie. Stąd wynika potrzeba wzbogacenia systemu o pomiar THD (Total Harmonic Distortion) i weryfikację sygnałów wejściowych w oparciu o ten współczynnik. Użytkownik otrzyma stosowną informację o wartości współczynnika. W przypadku przekroczenia dopuszczalnego poziomu zniekształceń sygnałów program wygeneruje ostrzeżenie.

6. Zakończenie

Prototyp mikrokomputerowego systemu do pomiaru impedancji spełnia założenia stawiane na początku pracy. Ten przyrząd pomiarowy jest oparty o zasadę trzech woltmierzów i w pełni ją realizuje. W celu zapewnienia większych dokładności pomiarów można implementować algorytmy identyfikacji sygnałów wejściowych zamiast wykonywania całkowania numerycznego. FFT może wówczas posłużyć do określenia warunków brzegowych identyfikacji.

Bibliografia

1. Bolkowski S. (2009): *Teoria obwodów elektrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s. 45, s. 76.
2. Zieliński T. (2007): *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., s. 241.
3. Chwałeba A., Poniński M., Siedlecki A. (2010): *Metrologia elektryczna*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s. 20, s. 119, s. 444.
4. Czajewski J. (2004): *Podstawy metrologii elektrycznej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 216, s. 217. ■

Microcomputer impedance measurement system

Abstract: The article includes description of measurement system, its advantages and disadvantages. That system performs impedance measurement. Described is a method and its implementation. Point 1 is about structural part of project. Then the idea of measurement using three voltmeters is discussed and supported by analytical equations. In the next part is presented in detail how to implement algorithmic measurement. Divided the point 3 for six paragraphs, each of which relates to the next stage of processing input signals up to receive the result Point 4 is purposed to determining input parameters ranges. In Point 5, talking about improvements to the measuring system. The authors presents some suggestions that can be implemented to increase the accuracy of the instrument, and independence from external devices.

Keywords: measurement, impedance, three voltmeters method, measurement system, THD, FFT

Piotr Ostrogórski

Student V roku Akademii Górniczo-Hutniczej Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika. Specjalizuje się w automatyce i metrologii. Członek koła naukowego ECART. Zainteresowania: programowanie niskopoziomowe, pomiary wielkości elektrycznych, modelowanie matematyczne i mikrokontrolery z rodzin: AVR i ARM wraz z układami peryferyjnymi.



e-mail: 0.0.0.0@zoho.com

Grzegorz Rogoń

Student Akademii Górniczo-Hutniczej Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika. Członek koła naukowego ECART. Zainteresowania: modelowanie matematyczne, sztuczne sieci neuronowe, automaty komórkowe, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, elektronika, konstrukcja systemów wbudowanych.



e-mail: gregussss@gmail.com



Koło Naukowe ECART

Koło Naukowe ECART powstało w 1990 r. przy Zakładzie Metrologii (obecnie Katedra Metrologii) Instytutu Maszyn i Sterowania Układów Elektroenergetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od początku działalności aż do chwili obecnej opiekunem naukowym koła i wszystkich projektów w nim realizowanych jest dr inż. hab. Andrzej Bień, prof. AGH.

Członkowie koła, indywidualnie lub w zespołach, zajmują się projektowaniem i konstruowaniem systemów pomiarowych zbudowanych w oparciu o procesory sygnałowe i mikrokontrolery jednocukładowe. Wszystkie prowadzone projekty są pracami aplikacyjnymi, których końcowym etapem są w pełni funkcjonalne przyrządy pomiarowe. Efekty prac prezentowane są podczas Studenckiej Sesji Kół Naukowych Pionu Hutniczego, niejednokrotnie zajmując tam czołowe miejsca.

Działalność koła:

- budowa systemów pomiarowych opartych na procesorach sygnałowych i kontrolerach jednocukładowych, działalność prowadzona w ramach badań własnych,
- prace pomiarowe w laboratoriach oraz obliczenia z wykorzystaniem specjalistycznych programów,
- uczestniczenie w ruchu studenckich kół naukowych (sesje studenckich kół naukowych).

Dane kontaktowe:

Koło Naukowe ECART
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH
Katedra Metrologii
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
pawilon B-1
abien@agh.edu.pl
www.ecart.agh.edu.pl

My wiemy kto wie...



www.automatyka.pl

Serwis branżowy www.automatyka.pl gromadzi informacje o produktach i usługach z branży automatyki przemysłowej. Zasoby Serwisu tworzone są samodzielnie przez zarejestrowane firmy. Każda z nich wprowadza informacje o własnej ofercie, produktach, usługach, wydarzeniach. Dzięki temu Serwis prezentuje żywy, stale aktualny obraz branży. Jest szybkim i skutecznym środkiem komunikacji pomiędzy uczestnikami rynku.

www.automatyka.pl – cała branża w zasięgu ręki