

# Identyfikacja wybranych parametrów plazmotronowego reaktora plazmowego

Roman Szewczyk, Jakub Szałatkiewicz, Eugeniusz Budny, Tadeusz Missala,  
Wojciech Winiarski

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę identyfikacji wybranych parametrów cieplnych plazmotronowego reaktora plazmowego zbudowanego w PIAP. Reaktor plazmowy jest kluczowym elementem opracowanego stanowiska badawczego, przeznaczonego do prowadzenia badań nad przetwarzaniem i odzyskiem metali ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, a w szczególności elektronicznych obwodów drukowanych. Do identyfikacji wykorzystano temperaturę odpowiedź skokową pieca przy wymuszeniu na poziomie 50 kW mocy dostarczanej przez plazmotrony do wnętrza reaktora. Jako transmitancję  $G(s)$  obiektu przyjęto model inercyjny drugiego rzędu. Przedstawiono wynik modelowania oraz opis reaktora plazmowego będącego obiektem modelowanym.

**Słowa kluczowe:** recykling, utylizacja odpadów elektronicznych, technologia plazmowa, identyfikacja obiektu inercyjnego

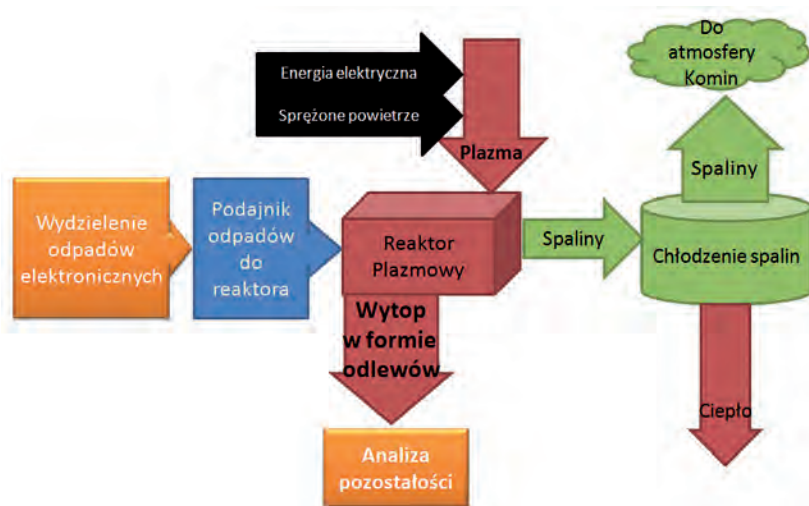
## 1. Wprowadzenie

Cyfryzacja i elektronizacja większości urządzeń i maszyn wiąże się z koniecznością stosowania w nich elektronicznych obwodów drukowanych, które po zakończeniu użytkowania stają się niebezpiecznym odpadem. Masowa produkcja urządzeń elektrycznych i elektronicznych, w których stosowane są drukowane obwody elektroniczne (PCB), powoduje znaczne wykorzystanie surowców naturalnych, w postaci nieodnawialnych złóż metali szlachetnych i metali ziem rzadkich, które są niezbędne do ich wytwarzania. Wykorzystane do produkcji urządzeń metale pozostają w odpadach wycofanego z użytku sprzętu elektrycznego i elektronicznego i mogą stanowić ich cenne źródło. Dlatego przetwarzając odpady zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego ZSEE jednocześnie można odzyskać do ponownego wykorzystania nieodnawialne surowce i zneutralizować negatywne oddziaływanie tych niebezpiecznych odpadów na środowisko.



**Rys. 1.** Widok stanowiska badawczego: 1. Reaktor plazmowy, 2. Plazmotron, 3. Odbiór wytopu, 4. Komin z wyciągiem spalin, 5. Przenośnik porcji odpadów z zasobnikiem liniowym, 6. Moduł zasilania plazmotronu, 7. Szafa PLC – sterowanie i akwizycja danych, 8. Podajnik porcji odpadów do reaktora

**Fig. 1.** Overview of laboratory setup: 1. Plasma reactor, 2. Plasmatron, 3. Molten product collection, 4. Fumes exhaust – chimney, 5. Waste package transporter, 6. Plasmatron power supply, 7. PLC – automation and data collection apparatus cabinet, 8. Automatic waste package feeder



**Rys. 2.** Schemat blokowy ciągu technologicznego do badań wysokotemperaturowej technologii przetwarzania i utylizacji wybranych odpadów elektronicznych i elektrycznych (ZSEE) przy użyciu reaktora plazmowego, umożliwiającej odzysk metali szlachetnych i metali ziem rzadkich

**Fig. 2.** Block diagram of the designed process for research over high temperature plasma technology for metals recovery and electronic scrap utilization

Odpady zużytego sprzętu elektronicznego i elektrycznego to problem globalny o znaczącej skali. Szacuje się, że masa wytwarzanych w 27 krajach EU odpadów ZSEE wynosiła 8,3–9,1 mln Mg (ton) w 2005 r., z czego 25 % jest zbierane i przetwarzane, zaś pozostałe 75 % nie jest rejestrowane [1, 2]. Problem rosnącej masy odpadów ZSEE [3, 4] dotyczy w największym stopniu krajów wysokorozwiniętych. W Szwecji zbiera się 16,7 kg/osobę zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, w Wielkiej Brytanii 8,2 kg/osobę, w Austrii 6,5 kg/osobę [5]. W Polsce zamierza się zbierać 4 kg zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na osobę, jednakże w 2010 r. zebrano 2,8 kg/osobę i w 2011 r. 3,55 kg/osobę [6]. Rosnąca masa zbieranych odpadów oraz ciągły wzrost podaży nowych urządzeń na rynek prowadzi do konieczności opracowania nowych technologii i metod przetwarzania ZSEE, aby odzyskać zawarte w nich surowce oraz je unieszkodliwić.

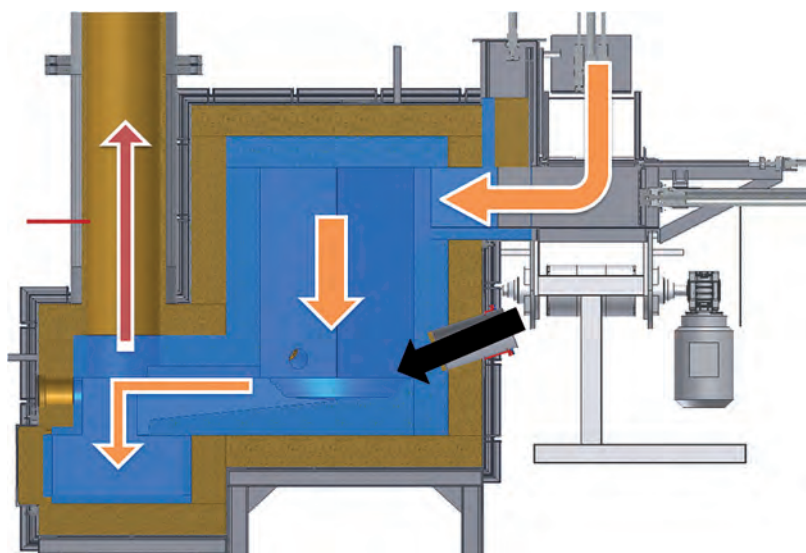
Takie działanie jest szczególnie istotne w Polsce ze względu na istniejącą lukę technologiczną i organizacyjną między naszym krajem a krajami Europy Zachodniej, a także ze względu na regulacje prawne (nowelizacja z 2012 r. dyrektywy WEEE 2002/96/EC) [7] w skali UE dotyczące przetwarzania odpadów ZSEE.

Tradycyjne, proste technologie przetwarzania ZSEE pozwalają na skuteczne przetworzenie większości masy urządzeń ZSEE. Jednakże po procesach takich jak demontaż i mechaniczna obrób-

ka poprzez mielenie, pozostają frakcje odpadów, których przetwarzanie wymaga specjalistycznych technologii i procesów. Jedną z tych frakcji są elektroniczne obwody drukowane oraz podsitowa pozostałość po mieleniu odpadów i separacji uzyskanych frakcji, zawierająca znaczne ilości zmielonych obwodów elektronicznych.

Aktualnie w Europie istnieje kilka zakładów przetwarzających odpady elektronicznych obwodów drukowanych w technologiach pirometalurgicznych. W Polsce brak jest takich instalacji. Odpady elektronicznych obwodów drukowanych stanowią jedynie część wsadu w tych technologiach, ze względu na swój skład i jego wpływ na prowadzony proces. Brak kompleksowych procesów pozwalających na całkowitą neutralizację i odzysk metali z odpadów elektronicznych obwodów drukowanych był podstawą do przedsięwzięcia projektu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, mającego na celu zbadanie możliwości zastosowania procesu plazmowego do ich przetwarzania.

W Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP powstało stanowisko do plazmowego przetwarzania odpadów elektronicznych obwodów ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego w celu odzysku z nich metali (rys. 1). Kluczowym elementem stanowiska jest reaktor plazmowy, w którym zastosowano trzy źródła plazmy w postaci plazmotronów rozmieszczone na jego obwodzie co 120°. Stanowisko wyposażone jest w aparaturę pomiarową i urządzenia pomocnicze niezbędne do utrzymania pracy reaktora, akwizycji danych oraz prowadzenia badań.



**Rys. 3.** Przekrój poprzeczny reaktora plazmowego z uwidocznionym kierunkiem przepływu odpadów i wytopu (pomarańczowe strzałki z góry do dołu), spalin (czerwona strzałka), oraz plazmy (czarna strzałka)

**Fig. 3.** Cross section through plasma reactor with presented material flow. Waste, and molten product – orange arrows, Plasma – black arrow, fumes – red arrow

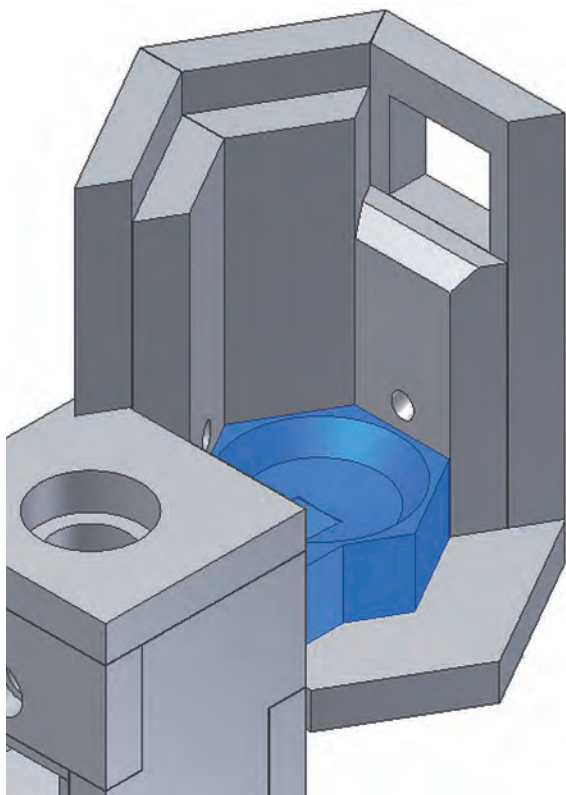


W ramach prowadzonego projektu badawczo-rozwojowego został opracowany wysokotemperaturowy reaktor plazmowy. Reaktor ten jest częścią ciągu technologicznego do realizacji badań nad wysokotemperaturową technologią przetwarzania i utylizacji wybranych odpadów elektronicznych i elektrycznych ZSEE umożliwiającym odzysk metali szlachetnych i metali ziem rzadkich.

Opracowane stanowisko pozwala na realizację szerokiego zakresu badań nad technologią przetwarzania wybranych odpadów elektronicznych i elektrycznych w celu odzysku z nich metali i jednoczesnego unieszkodliwienia tych odpadów. Proces przetwarzania opiera się na kolejnych, kluczowych krokach przedstawionych na schemacie (rys. 2). Wydzielone odpady są podawane automatycznym podajnikiem porcji odpadów do wnętrza reaktora plazmowego, gdzie na skutek działania strumieni plazmy ulegają one spalaniu oraz stopieniu. Substancje organiczne zawarte w odpadach są spalane w temperaturze plazmy, a produkty spalania są następnie schładzane w celu odzysku z nich ciepła. Z kolei metale i niemetale w formie płynnej spływają do formy, w której zastygają i mogą zostać ponownie wykorzystane. Na rys. 3 przedstawiono przekrój poprzeczny komory reaktora uwidaczniając drogę odpadów – pomarańczowe strzałki, strumień plazmy – czarna strzałka, oraz kierunek strumienia spalin – czerwona strzałka.

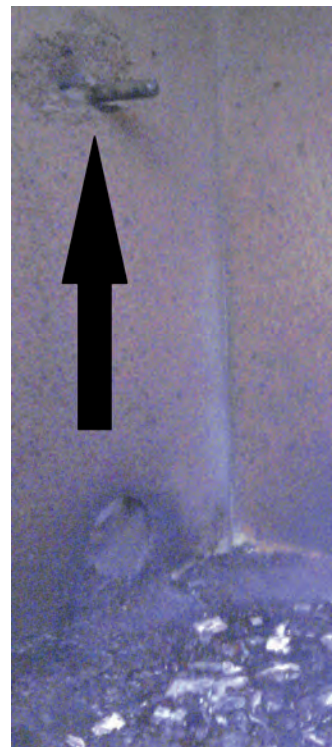
## 2. Konstrukcja komory reaktora

Reaktor jest wykonany z trzech warstw: betonu ogniotrwałego, izolacji termicznej, oraz metalowego płaszcza. Komora reaktora ma kształt sześcioboku (rys. 4). Konstrukcja ta pozwala na utrzymanie w jej wnętrzu temperatury rzędu



Rys. 4. Budowa wewnętrznej komory reaktora

Fig. 4. Internal construction of plasma reactor



Rys. 5. Lokalizacja punktu pomiaru temperatury w reaktorze plazmowym

Fig. 5. Placement of the temperature measurement probe

1500–1650 °C. Z kolei w strefie bezpośredniego działania palników plazmowych temperatura wielokrotnie przewyższa temperaturę pracy reaktora mierzoną w jego objętości, lecz ze względu na trudność pomiaru temperatury powyżej 2000 °C nie jest ona aktualnie mierzona. Potwierdzeniem faktu występowania w tej strefie temperatury powyżej 2000 °C jest formowanie się karbidu, który w jednej z prób został odnaleziony w uzyskiwanym wytopie.

### 2.1. Źródło ciepła w reaktorze

Źródłem ciepła w opracowanym reaktorze plazmowym są trzy plazmotrony łukowe o mocy rzędu 20 kW każdy. Plazmotrony osiągnęły 80-procentową sprawność cieplną przemiany energii elektrycznej w plazmę, ale względem energii pobieranej z sieci po uwzględnieniu sprawności zasilacza ich sprawność wynosi około 70 %. Przedstawiona analiza i identyfikacja parametrów cieplnych reaktora została przeprowadzona przy średniej mocy ciągłej 3 plazmotronów na poziomie 50 kW.

Plazmotrony generują strumień plazmy wytwarzanej ze sprężonego powietrza, który wypływa do dolnej części komory reaktora. Trzy plazmotrony w trakcie pracy zużywają 11 Nm<sup>3</sup>/h powietrza. Wyjście osi dyszy plazmotronów jest umieszczone w dolnej części komory reaktora.

### 2.2. Pomiar temperatury w komorze reaktora

Temperatura wewnątrz komory mierzona jest w odległości 30 mm od ścianki. Czujnik umieszczony jest na wysokości 350 mm nad dnem reaktora i jest usytuowany w osi ściany komory. Temperatura mierzona jest termoparą typu B, jej lokalizację przedstawiono na rys. 5.

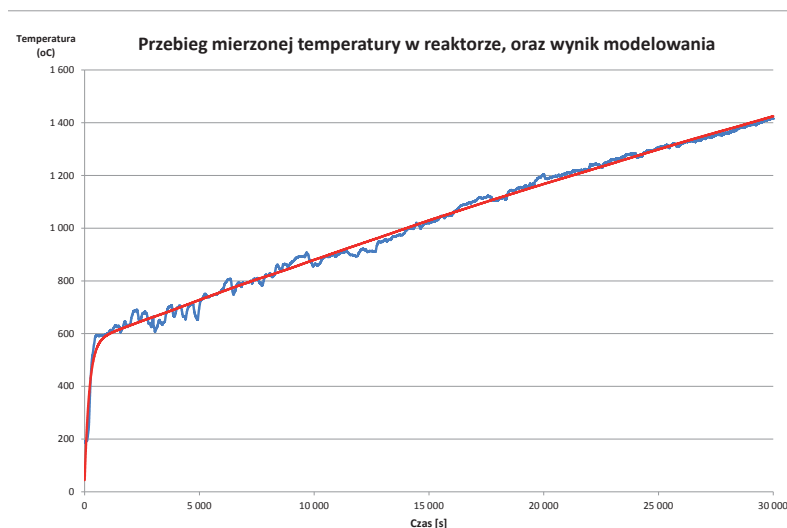
### 3. Identyfikacja parametrów cieplnych reaktora

Identyfikacja parametrów cieplnych reaktora plazmowego została przeprowadzona w trakcie jego nagrzewania plazmotronami bez wsadu. Do identyfikacji wykorzystano temperaturę odpowiedź skokową pieca przy założeniu wymuszenia na poziomie 50 kW mocy dostarczanej przez plazmotrony do wnętrza reaktora.

Jako transmitancję  $G(s)$  obiektu przyjęto model inercyjny drugiego rzędu dany zależnością (1).

$$G(s) = \frac{K_p}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)} \quad (1)$$

Przyjęcie modelu inercyjnego drugiego rzędu ma uzasadnienie fizyczne. W piecu występują dwa obszary gdzie, w trakcie nagrzewania, akumuluje się ciepło. Jednym z nich jest komora pieca (widoczna w środkowej części rys. 3 i 4), a drugim jego betonowa obudowa. Z oczywistych powodów, stałe czasowe związane z akumulacją ciepła w komorze pieca i jego obudowie będą znacząco różne. Pomija się trzeci obszar akumulacji ciepła w izolacji cieplnej znajdującej się wokół betonowej obudowy.



**Rys. 6.** Wynik pomiaru temperatury w reaktorze (kolor niebieski) oraz wynik modelowania (kolor czerwony)

**Fig. 6.** Result of temperature measurement inside the plasma reactor (blue color), and modeling result (red color)

Do identyfikacji parametrów pieca, zgodnie z transmitancją daną zależnością (1), zastosowano optymalizację gradientową z wykorzystaniem sumy najmniejszych kwadratów różnic. W trakcie identyfikacji wykazano, że opóźnienie występujące w obiekcie jest pomijalnie małe. W rezultacie zrezygnowano z członu odpowiadającego za opóźnienia w transmitancji danej zależnością (1). W wyniku procedury identyfikacji uzyskano następujące wyniki:

$$K_p = 59,3 \pm 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$$

$$T_{p1} = 80\,000 \pm 1000 \text{ s}$$

$$T_{p2} = 202 \pm 2 \text{ s}$$

Wyniki pomiarów rzeczywistej temperatury pieca oraz wyniki odpowiedzi wyznaczonego modelu podano na rys. 6.

Z praktycznego punktu widzenia należy przyjąć, że stała czasowa nagrzewania się komory pieca wynosi około 3 minut, natomiast stała czasowa nagrzewania się betonowych ścian pieca to ponad 22 godziny. Ponadto transmitancja (1) umożliwia wyznaczenie temperatury, którą docelowo osiągnie piec po odpowiednio długim czasie nagrzewania. Temperatura ta dana jest zależnością (2).

$$T_{max} = K_p P \quad (2)$$

gdzie  $P$  jest sumaryczną mocą cieplną uzyskiwaną z plazmotronów w reaktorze.

Z zależności (2) wynika, że po odpowiednio długim czasie nagrzewania, przy zasilaniu o mocy wynoszącej 50 kW i parametrze  $K_p$  równym  $59 \text{ } ^\circ\text{C/kW}$ , piec osiągnąłby temperaturę  $2965 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Należy podkreślić, że w temperaturze przekraczającej  $1800 \text{ } ^\circ\text{C}$  dochodzi do trwałego uszkodzenia niektórych elementów pieca.

Identyfikację transmitancji pieca dokonano przy założeniu, że jest on obiektem liniowym. Założenie to jest jedynie przybliżeniem, ponieważ przewodność cieplna betonu, z którego wykonano piec znacząco zmienia się w funkcji temperatury. Ponadto przedstawiona identyfikacja parametrów reaktora plazmowego została wybrana spośród wielu możliwych nastaw zmiennych mających wpływ na odpowiedź reaktora. Ze względów praktycznych i przez wzgląd na ograniczoną objętość pracy przedstawiono identyfikację dla najczęściej stosowanych parametrów jego pracy. Uzyskana transmitancja obiektu może być wykorzystana do opracowania algorytmu sterowania reaktorem w zakresie temperatury wymaganej do jego prawidłowej pracy, tzn. od około  $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$  do  $1700 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 5. Podsumowanie

Określenie parametrów cieplnych reaktora plazmowego pozwoliło na identyfikację i potwierdzenie, że zachowuje się on jak obiekt inercyjny II rzędu. Przyjęta do modelowania odpowiedzi temperaturowej pieca transmitancja obiektu umożliwia wyznaczenie temperatury, do której nagrzej się reaktor po określonym czasie pracy, przy zadanych parametrach. Ponadto będzie ona podstawą doboru układu automatycznej regulacji temperatury w piecu, co jest niezbędne w trakcie prowadzenia procesu aby utrzymać stabilne jego parametry oraz jest niezbędna do matematycznego modelowania pracy reaktora plazmowego wyposażonego w 3 palniki plazmowe.

### Podziękowania

Praca została sfinansowana z projektu badawczo-rozwojowego, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, realizowanego przez NCBIR nr N R03 0083 10.

## Bibliografia

1. Huisman J., *2008 Review of Directive 2002/96 on WEEE, Final Report* United Nations University, 2007.
2. Cobbing M., *Toxic Tech: Not In Our Backyard*, Greenpeace.org, 2008.
3. Lee, J., Song H., Yoo J., *Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea*, Resources Conservation & Recycling nr 50, 2007.
4. Kang H., Schoenung J., *Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options*, "Resources, Conservation & Recycling", nr 45, 2005, 368–400.
5. Wawrzonek R., *Praktyczne aspekty funkcjonowania systemu gospodarowania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym*, ElektroEco, 2009.
6. *Raport roczny Głównego Inspektora Ochrony Środowiska o funkcjonowaniu system gospodarki ZSEE 2010 i 2011.*
7. *Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, [http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm), [www.mg.gov.pl/English/ECONOMY/Industrial+Policy/ROHS+Directive], <http://pollighting.pl/o-zwiazku/rada-nadzorcza/nowelizacja-dyrektywy-o-zuzytym-sprzecie-weee>, [www.zipsee.pl/aktualnosci/112/zmiana-dyrektywy-weee.html].

### Identification of specific characteristics of plasmatron powered plasma reaktor

**Abstract:** The paper presents identification of heat characteristic of plasmatron-powered plasma reaktor designed and build in Industrial Research Institute for Automation and Measurements. Plasma reaktor is the key element of the test facility designed for research over processing and recovery of metals from the waste of electric and electronic equipment, focusing on electronic printed circuit boards. Identification was based on step response of the reaktor, with step input power provided by the plasmatrons of about 50 kW. Object transfer function  $G(s)$  was assumed as inertial II order. This assumption was confirmed during identification. The modeling object, plasma reaktor construction, and results of investigation are presented in the text.

**Keywords:** recycling, electronic waste utilization, plasma technology, inertial object identification

#### prof. nzw. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Od 2000 r. pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z modelowaniem zjawisk magneto-mechanicznych, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz prognozowaniem rozwoju technologii (technological foresight).

e-mail: [rszewczyk@piap.pl](mailto:rszewczyk@piap.pl)



#### mgr inż. Jakub Szalatkiewicz

Pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP w Warszawie. Głównym obszarem zainteresowań zawodowych jest przetwarzanie odpadów w celu odzysku surowców i energii (termiczne, chemiczne, plazmowe, w tym piroliza i gazyfikacja), a także inne technologie plazmowe i ich zastosowanie w przemyśle. Ponadto realizuje projekty badawcze i wdrożenia przemysłowe innowacyjnych technologii procesowych, a także ich automatyzacji i sterowania.

e-mail: [jszalatkiewicz@piap.pl](mailto:jszalatkiewicz@piap.pl);  
[jakub.szalatkiewicz@gmail.com](mailto:jakub.szalatkiewicz@gmail.com)



#### prof. dr hab. inż. Eugeniusz Budny

Jest profesorem w Instytucie Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, konsultantem w PIAP, a także członkiem Komitetu Mechaniki PAN. W ostatnich pięciu latach uczestniczył jako główny wykonawca w trzech projektach badawczych i rozwojowych, w tym także w projekcie będącym przedmiotem prezentacji.

e-mail: [ebudny@piap.pl](mailto:ebudny@piap.pl)



#### prof. dr inż. Tadeusz Missala

Absolwent Wydziału Elektrycznego PŁ, doktoryzował się w 1963 r. na Wydziale Elektrycznym PW. Po 10-letniej pracy w przemyśle i 7-letniej na WAT od 1967 r. jest pracownikiem PIAP. W latach 1967–1988 kierował Ośrodkiem Automatyki Elektrycznej, obecnie Pełnomocnik Dyrektora ds. certyfikacji. Specjalności: automatyka i robotyka przemysłowa, bezpieczeństwo przemysłowe, elektromechaniczne elementy automatyki. Autor i współautor 5 książek i ponad 150 publikacji naukowych. Przewodniczący Komitetu Technicznego PKN nr 50 ds. Automatyki i robotyki przemysłowej.

e-mail: [tmissala@piap.pl](mailto:tmissala@piap.pl)



#### mgr inż. Wojciech Winiarski

Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej – specjalność: Automatyka i Metrologia. Obecnie kierownik Ośrodka Układów Pomiarowych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień wykozystania systemów pomiarów przemysłowych w zastosowaniach dla ochrony środowiska i odnawialnych źródeł energii.

e-mail: [wwiniarski@piap.pl](mailto:wwiniarski@piap.pl)

