

Automatyczne stanowisko pomiarowe do badań charakterystyk pracy plazmotronów łukowych

Jakub Szałatkiewicz, Rafał Kłoda, Roman Szewczyk
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwiązanie stanowiska pomiarowego, umożliwiającego badanie najważniejszych parametrów pracy plazmotronów. Opracowanie stanowiska badawczego jest niezbędne w celu pozyskiwania powtarzalnych danych z pomiarów parametrów pracy plazmotronów, optymalizacji ich konstrukcji, określenia bilansu energetycznego oraz ich cechowania, certyfikacji. Plazmotrony zasilane są energią elektryczną i gazem roboczym, a do ich chłodzenia stosuje się wodę. Parametry robocze plazmotronu zależą od wielu zmiennych związanych z ich geometrią, mocą, przepływem gazu roboczego i chłodzeniem. Stąd, aby określić wpływ poszczególnych zmiennych i ich wzajemne relacje, niezbędnym jest wykonanie wielu równoległych pomiarów. Pomiarów poszczególnych wielkości fizycznych realizowane są przy użyciu specjalistycznych, zespolonych przyrządów pomiarowych, umieszczonych w szafie pomiarowej. Pozwala to na integrację wszystkich pomiarów i ich digitalizację w jednym miejscu. Aby wykonać pomiary w trakcie pracy plazmotronu, szafę wyposażono w złącza umożliwiające wpięcie jej układów pomiarowych w obwody mierzonego urządzenia. Dobrano metody pomiarów: napięcia (V), prądu pracy (A), mocy pobieranej z sieci (W), przepływu gazu roboczego dm^3/min , przepływu i temperatury wody chłodzącej niezależnie dla anody i katody (dm^3/s). Mierzone parametry pracy plazmotronu są jednocześnie zapisywane co 1 s i wizualizowane w programie w środowisku LabVIEW, na ekranie komputera PC. System pomiarowy, na podstawie wielkości mierzonych, automatycznie wylicza bilans energetyczny, sprawność cieplną plazmotronu oraz inne istotne parametry eksploatacyjne urządzenia.

Słowa kluczowe: bilans energetyczny, pomiary, badania sprawności, cechowanie, plazmotron, automatyka, energia, plazma, chłodzenie.

1. Wstęp

Fizyczne parametry pracy plazmotronów, takie jak uzyskiwane ekstremalnie wysokie temperatury plazmy, wysoka gęstość energii, chemiczna reaktywność plazmy, umożliwiają opracowanie nowych alternatywnych technologii i procesów w stosunku do obecnie istniejących. Procesy te nie mogą być realizowane w inny sposób, niż przy wykorzystaniu technologii plazmowych, a ich atrakcyjność powoduje, że są coraz szerzej stosowane w przemyśle [1].

W każdym procesie plazmowym kluczowym elementem jest jej źródło, częstokroć jest to plazmotron łukowy, którego własną wersję opracował autor niniejszego artykułu. W celu umożliwienia dalszego rozwoju opracowanej konstrukcji, optymalizacji parametrów pracy i cechowania wytwarzanych urządzeń, stało się niezbędne opracowanie stanowiska realizującego powtarzalne pomiary parametrów pracy plazmotronów. Sta-

nowisko takie powstało i jest eksploatowane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w Warszawie.



Rys. 1. Plazmotron łukowy o mocy 50 kW z doprowadzonymi przewodami zasilającymi (konstrukcja własna)

Fig. 1. 50 kW Arc plasmatron with supply leads (own construction)

2. Przedmiot badań, plazmotron łukowy

Plazmotron łukowy (rys. 1) jest to źródło plazmy, działające na zasadzie podgrzewania gazu roboczego w łuku elektrycznym wewnątrz urządzenia, wytwarzając w ten sposób strumień plazmy (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Badany w trakcie pracy plazmotron, fotografia w świetle widzialnym

Rys. 2. Plasmatron during work parameters investigation, photograph in visible light



Rys. 3. Badany w trakcie pracy plazmotron, fotografia wykonana przez szybę spawalniczą

Rys. 3. Plasmatron during work parameters investigation, photograph in through darkened glass

Plazmotrony będące przedmiotem badań zasilane są energią elektryczną z sieci 3-fazowej przez zasilacz. Ich moc to 50 kW. W trakcie pracy plazmotronu wydzielane są duże ilości ciepła, stąd plazmotron łukowy chłodzony jest obiektem wodnym.

3. Automatyczne stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe zostało zabudowane w szafie typu Rack 19", z doprowadzonymi do niej przyłączami wody, gazu, przewodów elektrycznych i sygnałowych. Wygląd stanowiska przedstawiają rys. 4 i 5. Oprócz zablokowania aparatury pomiarowej, szafa Rack 19" służy jako ekran przeciwko zakłóceniom elektro-magnetycznym i pozwala na jej łatwe przemieszczanie.



Rys. 4. Szafa pomiarowa umożliwiająca pomiary i ich digitalizację, widok zainstalowanej aparatury

Rys. 4 Measurement cabinet allowing measurements and theirs digitalization, view of installed apparatus



Rys. 5. Szafa pomiarowa umożliwiająca pomiary i ich digitalizację, widok doprowadzeń przewodami zasilania elektrycznego, pneumatycznego, hydraulicznego

Rys. 5. Measurement cabinet allowing measurements and theirs digitalization, view of power, pneumatic and hydraulic connectors

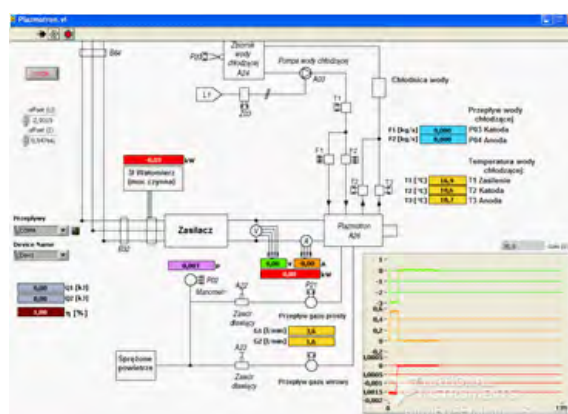
3.1. Integracja sygnałów

W celu realizacji badań w oparciu o wiele różnych wielkości fizycznych w czasie rzeczywistym niezbędne jest, obok przeprowadzenia pomiarów, ich równoczesne przetwarzanie, zapis i wizualizacja. Przyjęto rozwiązanie integracji sygnałów, w wizualnym środowisku LabVIEW na komputerze PC, przy użyciu wielokanałowej analogowo-cyfrowej karty pomiarowej USB-6218 firmy National Instruments. Dokonany wybór rozwiązania z wykorzystaniem produktów National Instruments, podyktowany był dobrą współpracą wysokiej klasy karty pomiarowej ze środowiskiem programowania LabVIEW, umożliwiającym integrację wielkości mierzonych w stanowisku badawczym.

Pomiary poszczególnych wielkości fizycznych, realizowane przez urządzenia pomiarowe, są przetwarzane w nich do sygnału analogowego 0-10 V (ze względu na rodzaj wejść karty pomiarowej), po czym są przesyłane do komputera i integrowane w programie LabVIEW. Wyjątkiem jest przesyłanie zliczonych impulsów określających ilość przepływającej wody chłodzącej, które jest realizowane przez interfejs RS-232 do komputera.

3.1.1. Panel programu

Program automatycznego stanowiska badawczego integruje, wizualizuje, oblicza i zapisuje uzyskane pomiary. Wygląd okna programu przedstawiono na rys. 6. Składa się ono ze schematu instalacji z naniesionymi na nim indykatorami wyświetlającymi aktualne wartości poszczególnych pomiarów, sprowadzone do spójnych jednostek i czasu.



Rys. 6. Widok ekranu programu pomiarowego

Rys. 6. View of main program window

3.2. Pomiary realizowane na stanowisku badawczym

3.1.1. Pomiary energii elektrycznej

Pomiary energii elektrycznej realizowane są w dwóch punktach, pierwszy na zasilaniu zasilacza (AC), określający pobór mocy z sieci i parametry pobieranej energii. Drugi realizowany jest na wyjściu z zasilacza (DC) określający parametry i ilość energii dostarczanej do plazmotronu.

Pomiar poboru energii z sieci 3-fazowej przez zasilacz, realizowany jest przy użyciu analizatora



Rys. 7. Analizator Parametrów Sieci ND20

Rys. 7. ND20 electrical power analyzer



Rys. 8. Przetwornik pomiarowy natężenia prądu LEM HAS-300
Rys. 8. Current transducer LEM HAS 300



Rys. 9. Przetwornik pomiarowy napięcia LEM LV-25p
Rys. 9. Voltage transducer LEM LV 25p

parametrów sieci ND20 (rys. 7) oraz przekładników prądowych ASR20.3, 125 A/5 A klasy 0,5, produkcji Lumel S.A. Mierzone wielkości elektryczne to: prądy fazowe, napięcia fazowe i między fazowe, z nich wyliczana jest moc całkowita, moc bierna, oraz symetryczność obciążenia. Standardowo stosuje się zapis całkowitej czynnej mocy chwilowej.

Pomiar parametrów energii wyjściowej z zasilacza DC, realizowany jest przez pomiary: napięcia, (0-800V) przez przetwornik napięcia LEM LV-25p (rys. 9), oraz pomiar prądu (0-300 A), przy użyciu przekładnika prądowego LEM HAS300 (rys. 8).

3.2.2. Pomiary ilości gazu roboczego plazmotronu

Pomiar ilości podawanego gazu roboczego (sprężone powietrze) do plazmotronu wykonywany jest przy użyciu dwóch przepływomierzy FESTO (rys.10) SFAB-600U i SFAB-200U, pozwalających na jednoczesny pomiar dwóch niezależnych strumieni gazowych o max przepływie 600 dm³/min. Dodatkowo mierzone jest ciśnienie i temperatura podawanego gazu roboczego przetwornikami ciśnienia WIKA A-10 (rys.11), oraz czujnikiem i przetwornikiem temperatury Pt 100.



Rys. 10. Przetworniki przepływu sprężonego powietrza FESTO FSAB
Rys. 10. Compressed air flow transducers FESTO FSAB



Rys. 11. Przetwornik ciśnienia WIKA-A-10
Rys. 11. Pressure transducer WIKA A10

Regulacja przepływu gazu roboczego odbywa się manualnie przez precyzyjne zawory dławiące, pozwalające na płynną zmianę ilości gazu podawanego do plazmotronu.

3.2.3. Pomiary parametrów układu chłodzenia wodnego

Stanowisko badawcze zostało wyposażone w dwa niezależne układy pomiarowe obiegu wody chłodzącej, co pozwala na pomiary odbieranego ciepła niezależnie z katody i anody plazmotronu.

Natężenie przepływu czynnika chłodzącego, mierzone jest przez 2 przepływomierze (rys. 12) SwissFlow 600 (0-0,33 dm³/s) z wyjściami impulsowymi (5 V). Karta pomiarowa National Instruments nie ma wejść impulsowych, stąd koniecznym było zastosowanie konwersji impulsów poprzez 2 liczniki Mikrokontrolera AtMega 162, i przesyłane zliczonej liczby impulsów w czasie 1s przez RS+232 do LabVIEW.

Temperatura czynnika chłodzącego mierzona jest w trzech punktach przez czujniki temperatury PT100 z przetwornikami AR580 Apar (rys. 13).



Rys. 12. Przepływomierze SwissFlow 600
Rys. 12. Water flow transducers SwissFlow 600



Rys. 13. Przetworniki temperatury AR5080
Rys. 13. Temperature transducers AR5080

3.3. Aplikacja w LabView – operacje na danych

3.3.1. Energia dostarczana do plazmotronu (DC)

Na podstawie pomiarów chwilowych napięcia u (V) i prądu i (A) obliczana jest moc P (W) dostarczona do urządzenia.

Ze względu na występujące pulsacje napięcia i prądu niezbędne było zwiększenie próbkowania obu przebiegów do 10 kHz i obliczanie mocy chwilowej z zależności (2).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \quad (2)$$

P – średnia moc czynna (W),

T – czas (s)

u(t) – napięcie chwilowe (V),

i(t) – prąd chwilowy (A),

Dodatkowo uzyskane wartości pomiarów napięcia u i prądu i (DC) są uśredniane dla 1 s i w tej formie zapisywane i wyświetlane w programie.

Z kolei pomiary parametrów energii pobieranej przez zasilacz z sieci 3+fazowej, w całości są realizowane przez Analizator ND20, w związku z tym nie było potrzeby wykonywania żadnych operacji matematycznych na nich i uzyskane wartości pomiarów są bezpośrednio wyświetlane i zapisywane w programie.

3.3.2. Układ chłodzenia

Uzyskane wartości temperatur: T_1 temperatura czynnika chłodzącego zasilającego plazmotron, T_2 i T_3 - temperatury wody podgrzanej, dla obiegu katody i anody, są wykorzystywane do obliczania ΔT (K) i podstawiane do wzoru (3) w celu obliczenia ilości ciepła odebranego przez układ chłodzenia.

Objętość przepływającej wody chłodzącej mierzona jest na zasilaniu plazmotronu w zimną wodę. Objętościowy przepływ wody (dm^3/s) jest przeliczany z impulsów do postaci strumienia masowego (kg/s), z uwzględnieniem zmiennej gęstości wody od temperatury i podstawiany do wzoru (3).

Odebrane ciepło Q (kJ/s) przez układ chłodzenia obliczane jest z zależności (3).

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

m – masa przepływającej wody (kg/s)

C_p – ciepło właściwe wody (czynnika chłodzącego) dla danej temperatury ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

ΔT – różnica temperatury wody zasilającej i powracającej $\Delta T = T_2, T_3 - T_1$ (K)

3.3.3. Bilans energii plazmotronu i sprawność

W uproszczeniu plazmotron jest urządzeniem przetwarzającym energię elektryczną w silnie skoncentrowaną energię cieplną. Całe ciepło wytwarzane w plazmotronie dzieli się na dwa główne strumienie. Pierwszy to ciepło odprowadzone wraz z plazmą, drugi to ciepło odprowadzone przez układ chłodzenia, według równania (4):

$$E_{el} = Q_p + Q_{chłodz} \quad (4)$$

E_{el} – energia elektryczna dostarczona do urządzenia obliczana ze wzoru (2) (W)

Q_p – energia wykorzystana na wytworzenie plazmy (W),

$Q_{chłodz}$ – całkowite ciepło odprowadzone przez układ chłodzenia obliczane ze wzoru (3) (W).

Sprawność urządzenia definiowana jest jako stosunek energii oddanej przez urządzenie w odniesieniu do energii (mocy czynnej), pobranej przez nie (5) i obliczane jest ze wzoru (5):

$$\eta = \frac{E_{el} - Q_{chłodz}}{E_{el}} * 100\% \quad (5)$$

η – sprawność (%)

E_{el} – energia elektryczna dostarczona do urządzenia obliczana ze wzoru (2) (W)

$Q_{chłodz}$ – całkowite ciepło odprowadzone przez układ chłodzenia obliczane ze wzoru (3) (W),

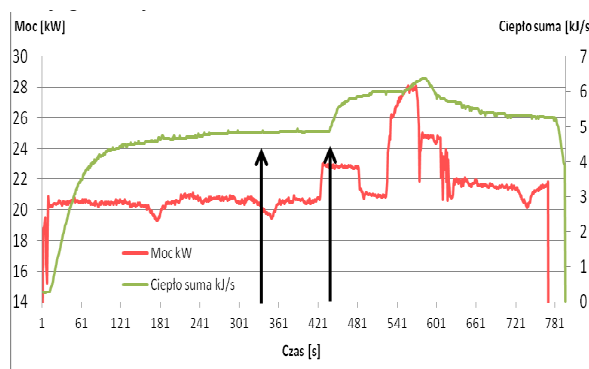
4. Prezentacja wybranych wyników pomiarów pracy plazmotronu

Z uzyskanych pomiarów wynika że parametry elektryczne plazmotronu w trakcie pracy, w dużym stopniu zależą od ilości gazu roboczego przepływającego przez plazmotron, a także od geometrii kanału anody. Poniżej przedstawiono wybrane charakterystyki i zestawienia uzyskanych pomiarów na automatycznym stanowisku badawczym.

4.1. Procedura pomiarowa

Procedura pomiarowa przebiega według następujących kroków. Włączenie zasilania stanowiska, uruchomienie programu. Włączenie plazmotronu. Ustalenie warunków pracy (kilka sekund), korekta parametrów pracy i odczekanie do ustalenia się stanów nieustalonych – nagrzewanie korpusu (około 5 min). Po każdej zmianie parametrów pracy należy odczekać ponownie (5 min) w celu ustalenia warunków pracy i uzyskania prawidłowego pomiaru.

Na rys. 14 przedstawiono proces nagrzewania się plazmotronu od początku pomiaru. Pierwsza strzałka na wykresie wskazuje obszar ustabilizowanych parametrów pracy – linię



Rys. 14. Przykładowy przebieg mocy dostarczonej do plazmotronu i ciepła odebranego przez układ chłodzenia

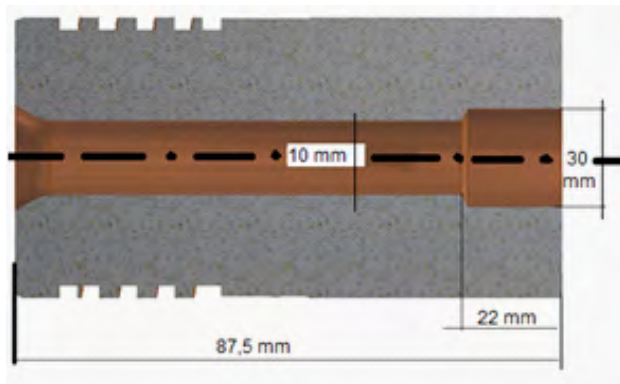
Rys. 14. Example of plasmatron power usage graph and heat received by water cooling

ilości ciepła odbieranego w trakcie pracy plazmotronu, a druga strzałka wskazuje zjawisko opóźnienia związane z bezwładnością cieplną plazmotronu, po zwiększeniu jego mocy.

4.2. Przykładowe wyniki pomiarów

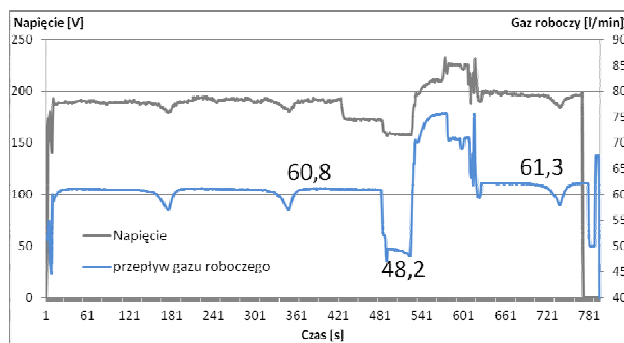
Badano wpływ geometrii anody na parametry pracy i sprawność plazmotronu. Wykonano pomiary dla dwóch średnic dyszy (anody) $\varnothing 8$ i $\varnothing 10$ (rys.15).

Uzyskane dane pozwalają na porównanie wpływu zmieni-nych na kluczowe parametry eksploatacyjne plazmotronu.



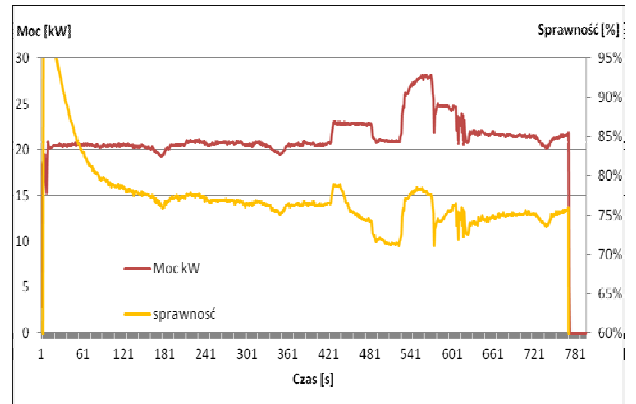
Rys. 15. Przekrój przez badaną anodę plazmotronu z przykładowymi wymiarami

Rys. 15. View of geometry of plasmatron anode with example dimensions



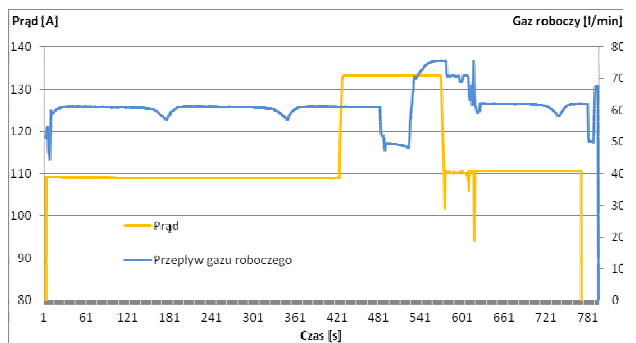
Rys. 16. Zestawienie charakterystyk pracy plazmotronu dla wartości przepływu gazu i napięcia pracy

Rys. 16. Plasmatron work parameters graph - gas flow and voltage



Rys. 17. Zestawienie charakterystyki pracy plazmotronu dla wartości mocy i sprawności

Rys. 17. Plasmatron work parameters graph – power and efficiency

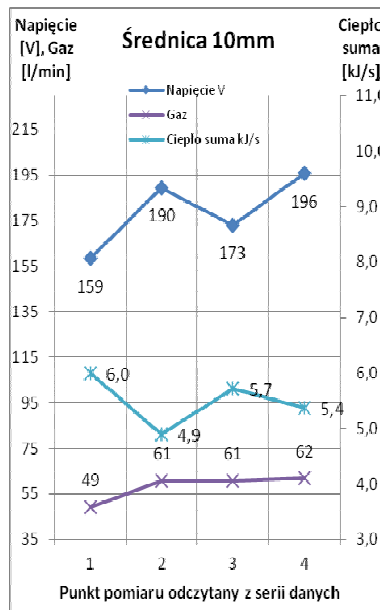


Rys. 18. Zestawienie charakterystyk pracy plazmotronu dla wartości prądu i przepływu gazu

Rys. 18. Plasmatron work parameters graph – current and gas flow

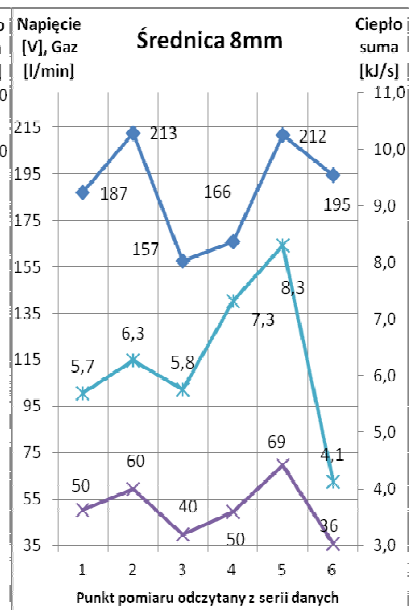
Na rys. 16 przedstawiono przebieg napięcia pracy plazmotronu w funkcji zmiennego przepływu gazu roboczego. Z kolei na rys. 17 przedstawiono przebiegi mocy plazmotronu i jego sprawności, która to sprawność jest zależna od parametrów geometrycznych dyszy, ilości gazu roboczego ale i od mocy. Z rys. 18 przedstawiającego przebieg prądu i ilości gazu plazmo twórczego wynika, że nie ma związku między tymi dwoma wartościami, gdyż zarówno prąd jak i przepływ gazu są wielkościami nastawnymi.

Poszczególne zestawienia uzyskanych danych dla różnych konstrukcji plazmotronów pozwalają na ich porównywanie i obliczanie wpływu danej zmiennej. Możliwe jest określenie zakresów stabilnej pracy jak i optymalnych punktów pracy o najwyższej sprawności. Przykładowo różnica między średnicą dyszy $\varnothing 10$ mm i $\varnothing 8$ mm przy tym samym przepływie gazu to 4,9 kJ/s ciepła odbieranego przez układ chłodzenia dla $\varnothing 10$ mm i 6,3 kJ/s dla $\varnothing 8$ mm. Przekłada się to na 75% sprawność dyszy o średnicy $\varnothing 10$ mm, w stosunku do 71 % sprawności dla $\varnothing 8$ mm średnicy dyszy. Zestawienie zebranych pomiarów zawierają rys. 19 i 20.



Rys. 19. Porównanie wybranych punktów stabilnej pracy plazmotronu dla anody o średnicy 10 mm

Rys. 19. Comparison of plasmatron stable work parameters for anode with channel of 10 mm diameter



Rys. 20. Porównanie wybranych punktów stabilnej pracy plazmotronu dla anody o średnicy 8 mm

Rys. 20. Comparison of plasmatron stable work parameters for anode with channel of 8 mm diameter

5. Podsumowanie

Opracowane stanowisko pozwala uzyskać szybkie, dokładne i powtarzalne dane z pomiarów w trakcie pracy plazmotronu. Zgrupowanie aparatury stanowiska badawczego w jednej szafie pomiarowej pozwoliło skutecznie ekranować je od zakłóceń elektromagnetycznych i przyczyniło się do poprawy warunków eksploatacyjnych.

Zbierane dane pomiarowe umożliwiają m.in.:

- upraszczanie konstrukcji plazmotronu,
- dobór optymalnych parametrów podzespołów plazmotronu,
- precyzyjne określenie sprawności uzyskiwanej przy różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych,
- pomiar wpływu czynników zewnętrznych na parametry pracy.

Ponadto na opracowanym automatycznym stanowisku badawczym możliwe są również pomiary innych urządzeń zasilanych w energię elektryczną, chłodzonych lub podgrzewanych cieczą, zasilanych w sprężone powietrze.

Projekt finansowany w ramach projektu badawczo rozwojowego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N R03 0083 10.

Bibliografia

1. German Federal Ministry of Education and Research: Plasma Technology Process Diversity + Sustainability. http://www.bmbf.de/pub/plasma_technology.pdf, Bonn, 2001.
2. Kurdziel R.: *Elektrotechnika*, PWN, 1973.
3. Ciborowski J.: *Inżynieria Chemiczna. Inżynieria Procesowa*, WNT, 1973.
4. Zhukov M., Zasyupkin I. i inni: *Thermal Plasma Torches: Design, Characteristics, Applications*, Cambridge International Science Publishing 2007.
5. Patryka W., Latek W., Bytnar A., i inni: *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 2, WNT, 1975. ■

Automated measurement system for investigation of arc plasmatron characteristics

Abstract: The paper, presents automated measurement system for investigation of key arc plasmatrons parameters. Automated measurement system allows to simultaneously and broadly investigate plasmatron work parameters. Collection of plasmatron operational data is required for optimization of theirs construction, efficiency determination, energy balance calculation, and calibration. Plasmatrons are powered with electrical energy and work gas, theirs cooling is carried out by water circuit. Work parameters of plasmatrons are depending on many factors, theirs geometry, power, gas flow and cooling. So to investigate influence of each factor, it is necessary to perform many simultaneous measurements. Each measurement of physical value is performed

by specialist combined sensor, located in measurement cabinet. Such approach allows for integration of all the measurements and digitalization of collected data in one place. Measurements have to be performed during normal operation of plasmatron, to allow such action, the measurement cabinet is equipped with connections allowing to hook it up to the plasmatron circuits. Developed automated measurement system carries out key measurements of plasmatron parameters: voltage, amperage, power, flow of plasma gas, flow and temperature of cooling fluid for anode, and cathode. Measured values, are simultaneously stored each second, and visualized in application software developed in LabView, on PC. Based on collected data the software of automated measurement system calculates energy balance, efficiency, and other important parameters of plasmatron during its exploitation.

Keywords: energy balance, measurements, efficiency measurement, calibration, plasmatron, automation, energy, plasma, cooling

mgr inż. Jakub Szałatkiewicz

Pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie. Głównym obszarem zainteresowań zawodowych autora jest przetwarzanie odpadów, termiczne, chemiczne, plazmowe, a także technologie plazmowe i ich zastosowania w przemyśle. Autor ponadto realizuje projekty badawcze i wdrożenia przemysłowe innowacyjnych technologii procesowych, a także automatyzacji i robotyzacji.

e-mail: jszalatkwicz@piap.pl



mgr inż. Rafał Kłoda

Pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów i Politechniki Warszawskiej na wydziale Mechatroniki w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej w Warszawie.

Specjalizuje się w informatycznych aspektach systemów przetwarzania danych oraz technikach multimedialnych.

e-mail: rkloda@piap.pl



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

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

e-mail: rszewczyk@piap.pl

e-mail: rszewczyk@piap.pl

