

Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania topliwości popiołu metodą rurową

Streszczenie. Praca opisuje zaprojektowany i wykonany piec rurowy przeznaczony między innymi do określania temperatury topliwości popiołu zgodnie z normą PN-ISO-540:2001. Prototypowe stanowisko laboratoryjne daje możliwość cyfrowej obserwacji próbki w trakcie badania oraz posiada kilka programów sterowania temperaturą dzięki czemu możliwe jest dokładne ustalenie programu badań.

Abstract. Designed and manufactured tube furnace for determination of the melting temperature of ash according to the ISO-540: 2001 standard was described in our paper. Construction of our prototype equipment allows for digital observation of the process. There are also some pre-defined temperature programs which are very useful for determination of the optimal investigation parameters of the equipment (**Characteristics of the prototype laboratory equipment for the investigation of the ash melting temperature in the tube furnace**).

Słowa kluczowe: wysokoczęstotliwościowe grzanie indukcyjne, określenie topliwości popiołów, metoda rurowa, chłodzenie wodą
Keywords: high frequency induction heating, researching ash fusibility, tube method, water cooling, electric power quality.

Wstęp

W produkowanych obecnie urządzeniach do badania topliwości popiołu metodą rurową stosowane są zwykle dwa typy wysokotemperaturowych elementów grzejnych: element sylicytowy wykonany z rekrytalizowanego węgla krzemu o temperaturze pracy do około 1500 [°C] oraz wykonane z dwukrzemka molibdenu o temperaturze pracy do 1850 [°C] [1, 4, 9]. Te elementy grzewcze charakteryzują się dużą trwałością przy wysokich temperaturach pracy, wzrostem rezystancji (spadkiem mocy) wraz ze wzrostem temperatury, wyjątkową kruchością oraz koniecznością zastosowania specjalnego rodzaju sterowania wzrostem temperatury. Należy również dodać, że w niektórych starszych rozwiązaniach grzejnych urządzeń do badania topliwości popiołów, jako elementy grzejne stosowane są również druty i taśmy oporowe umieszczone w materiałach ceramicznych. Dodatkowo, zgodnie z normami [N3, N4] urządzenia te muszą pracować w neutralnym środowisku gazowym.

Urządzenia do badania topliwości popiołu metodą rurową z wykorzystaniem procesu grzania oporowego, charakteryzują się dużą stałą czasową procesu nagrzewania (oraz procesu ochładzania) i stosowane normy zostały opracowane właśnie dla takich urządzeń [N1, N2]. Uniemożliwia to przeprowadzanie szybkich, szacunkowych badań topliwości popiołu metodą rurową, które często są niezbędne do wykonania dla paliw stałych na stanowiskach pomiarowych przy piecach [3].

Przedstawione w artykule opracowane urządzenia do badania topliwości popiołu metodą rurową nie posiadające wyżej wymienionych wad.

Można je scharakteryzować następująco:

- działa na zasadzie wykorzystania zjawiska rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego [2],
- prowadzi proces nagrzewania próbek popiołu szybko, aż do zaobserwowania i określenia temperatury płynięcia popiołu,
- posiada wymienną rurę wykonaną z materiału przewodzącego (grafitu), który w czasie procesu nagrzewania wydziela tlenek węgla i dwutlenek węgla w odpowiednich proporcjach, gwarantując atmosferę neutralną w jej wnętrzu,
- kilkuzwojowy wzбудnik wykonany z przewodzącej prąd elektryczny rurki chłodzonej wodą w obiegu zamkniętym, kumulujący energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej rurze grafitowej,

- stosunkowo lekkie i łatwe do przenoszenia, zasilane energią elektryczną prądu przemiennego 230 [V] o średnim poborze mocy.

Budowa i działanie układ przekształtnika

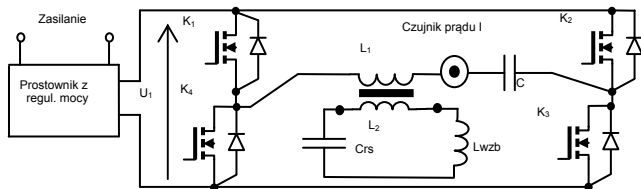
Laboratoryjne urządzenie do badania topliwości popiołu metodą rurową zaopatrzone w przekształtnik o obciążeniu rezonansowym, którego wzбудnik przekazuje energię do przewodzącej rury grafitowej. Efekt przenoszenia energii można zwiększyć przez wzrost wartości prądu zasilającego wzбудnik oraz przez wzrost częstotliwości pracy [6].

Aby uzyskać duże prądy i jak najmniejsze straty mocy w urządzeniu zastosowano transformator, którego strona wtórna, oprócz skupionej pojemności, rezystancji obwodu i indukcyjności wzбудnika i wprowadzanej do obwodu przez grzany element grafitowy, stanowią obwód rezonansowy szeregowy [6]. Ponieważ praktycznie wszystkie wartości obwodu rezonansowego nie ulegają zmianie w czasie pracy, dlatego w zaproponowanym układzie nie zastosowano pętli fazowej PLL, umożliwiającej samoczynne dostrojenie częstotliwości wyzwalania par tranzystorów mocy w zależności od częstotliwości rezonansowej całego układu. Zasilanie urządzenia zostało zaprojektowane i wykonane w układzie pełnego mostka H, w którego głównej gałęzi podłączony jest transformator oraz kondensator C blokujący składową stałą źródła zasilania (rys.1).

Wielkością wyjściową w stosowanym układzie przekształtnikowym o obciążeniu rezonansowym jest napięcie stałe o wartości U_s , które przekazywane jest do obciążenia za pomocą kluczkowania. W czasie od 0 do T_1 (rys. 1) załączane są klucze K_1 i K_3 a w czasie od T_1 do T_2 załączane są klucze K_2 i K_4 . Procesowi załączania i wyłączania odpowiednich par kluczy towarzyszy pojawienie się wymuszenia napięciowego na gałęzi rezonansowej R, L, C w postaci napięcia przemiennego o przebiegu zbliżonym do sinusoidy. W gałęzi strony pierwotnej transformatora znajduje się czujnik prądu, umożliwiający detekcję przejścia prądu przez zero. Znajomość chwili przejścia prądu przez zero jest niezbędna dlaysterowania odpowiednich par tranzystorów mocy typu MOSFET (kluczy sterujących) z zapewnieniem przerwy czasowej tak zwanego „death-time” służącej do wyeliminowania przypadków równoczesnego włączenia obu par kluczy.

Dla częstotliwości powyżej 150 [kHz] mogą pojawić się problemy z działaniem układów sterowania ponieważ

zaczynają odgrywać rolę efekty polowe (efekt zbliżenia przewodów, efekt wypierania prądu czyli zjawisko naskórkowości oraz inne), nie ujawniające się tak ostro przy pracy układów elektronicznych na częstotliwościach niższych [7, 8]. Dlatego powszechnie przyjmuje się, że układy sterowania pracują dobrze o ile ich częstotliwość pracy nie przekracza tej wartości. Zaproponowane rozwiązanie jest efektem poszukiwania kompromisu a zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne w istniejących warunkach na dziś, autorom pracy, wydaje się być rozwiązaniem zbliżonym do optymalnego.



Rys. 1. Uproszczony schemat działania układu przekształtnikowego.

Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia: U_1 - napięcie zasilania obwodu, K - tranzystory mocy typu MOSFET, D - diody zwrotne, L_1 - indukcyjność strony pierwotnej transformatora, L_2 - indukcyjność strony wtórnej transformatora, L_S - indukcyjność pozostałych elementów obwodu rezonansowego (wzbudnika wraz z rurą grafitową), C_{rs} - pojemność kondensatora rezonansowego i pojemność strony wtórnej transformatora, R_2 - niewielka rezystancja strony wtórnej transformatora (tu pominięta).

Praktycznie obciążeniem roboczym urządzenia jest wzbudnik indukcyjny wykonany z rurki miedzianej, połączony szeregowo z baterią kondensatorów. Wewnątrz wzbudnika znajduje się odizolowana termicznie od niego rura grafitowa stanowiąca komorę roboczą.

Nagrzewanie rury grafitowej odbywa się w procesie dwustanowym, włącz – wyłącz, sterowanym przez regulator temperatury z funkcją „rampingu”.

Praktyczna realizacja stanowiska laboratoryjnego

Widok badanego stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Parametry techniczne urządzenia grzejnego (RZ-1) są następujące:

- sieciowe napięcie zasilania $U=230$ [V],
- moc czynna $P=2,0$ [kW],
- częstotliwość pracy wzbudnika $f=117$ [kHz],
- indukcyjność $L_{wzb}=1,4$ [μ H],
- pojemność w postaci baterii kondensatorów złożona z kondensatorów typu HC-03 [5] o pojemności całkowitej $C_{rs}=1,6$ [μ F].



Rys. 2. Zrealizowane praktycznie prototypowe stanowisko laboratoryjne. U dołu układ przekształtnika, powyżej układ wyjściowy, u góry wzbudnik z rurą grafitową.



Rys. 3. Zrealizowane praktycznie prototypowe stanowisko laboratoryjne. U dołu układ wyjściowy, u góry wzbudnik z rurą grafitową. W rurze widoczna badana próbka sprasowanego popiołu.

Wymiary falownika: długość 450 [mm], szerokość 250 [mm], wysokość 150 [mm]. Wymiary układu wyjściowego ze wzbudnikiem: długość 250 [mm], szerokość 150 [mm] wysokość 100 [mm], wymiary wzbudnika: średnica zewnętrzna 70 [mm], długość 45 [mm], wzbudnik wykonano z rurki miedzianej o średnicy $\phi 6$ [mm] o 6 zwojach. Wzbudnik chłodzony jest skutecznie wodą w obiegu zamkniętym. Urządzenie może pracować do temperatury 1500 [°C].

Do nastaw temperatury zastosowano regulator temperatury RE-3 z funkcją „rampingu” firmy Lumel S.A., Zielona Góra, pracujący w układzie regulatora typu PID z czujnikiem typu S PtRh-Pt (platyna-rod/platyna) o temperaturze pracy do 1600 [°C]. Czujnik temperatury umieszczony został w dolnej części rury grafitowej.

Badania eksploatacyjne indukcyjnego pieca laboratoryjnego

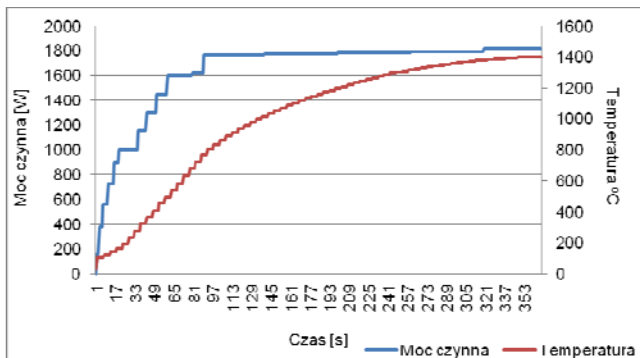
Badanie laboratoryjnego pieca indukcyjnego wykonano analizatorem parametrów sieci AS-3 Mini. Jest to urządzenie mikroprocesorowe przeznaczone do ciągłej rejestracji przebiegu obciążenia jak również do monitorowania standardów jakościowych energii elektrycznej zgodnie z obowiązującymi wymaganiami. Analizator umożliwia pomiar, oblicza i kontrolę przekroczenia parametrów w sposób ciągły z każdych 10 okresów sieci. Uzyskane widma sygnałów prądów i napięć pozwalają na wyliczenie m.in.:

- wartości skutecznych prądu i napięcia,
- mocy czynnej, biernej, pozornej i odkształconej,
- współczynnika mocy czynnej,
- zawartości harmonicznych,
- chwilowych wartości skutecznych napięcia (za 1 - 10 okresów).

Jest on również wyposażony w oscyloskop i rejestrator przebiegów, który może rejestrować przebiegi z częstotliwością próbkowania 6.4 [kHz] przez czas do 1.2 [s] lub 10 [s] z 5 [s] wyprzedzeniem wyzwolenia przy próbkowaniu 1.6 [kHz]. Analizator ten umożliwia ponadto

gromadzenie wyników pomiarów we własnej nieulotnej pamięci o pojemności 6 tys. zdarzeń.

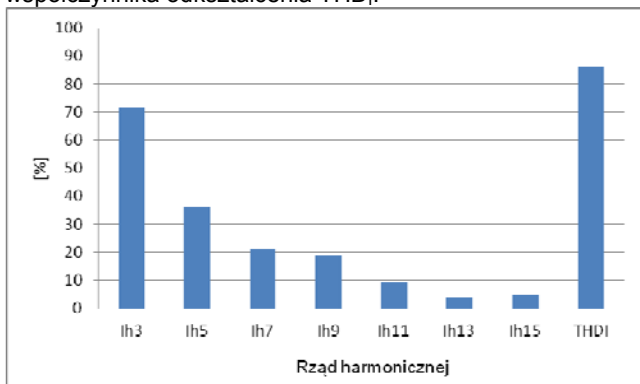
Podczas badań rejestrowano przebieg zmian pobieranej mocy czynnej przez piec indukcyjny w trakcie jego pracy. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmiany obciążenia oraz temperatury.



Rys. 4. Przebieg obciążenia oraz temperatury wewnątrz pieca

Na rysunku 4 widzimy, że zadaną temperaturę [1400°C] urządzenie do badania topiwośći popiołu metodą rurową osiągało bardzo szybko tj. po czasie ok. 350 [s]. W tym czasie pobierana moc czynna zwiększała się średnio o 18 [W] w czasie 1 [s], jednakże w początkowej fazie pracy zmiany te były na poziomie 80 [W·s⁻¹]. Po ustabilizowaniu się warunków pracy piec osiągał moc czynną na poziomie 1,8 [kW].

W trakcie badania zaobserwowano, że charakteryzowany obiekt pobierał prąd o częstotliwości podstawowej jak również o częstotliwościach będących jej wielokrotnością. Na rysunku 5 pokazano średnie udziały prądów wyższych harmonicznych oraz wartość współczynnika odkształcenia THD_I.



Rys. 5. Udział prądów wyższych harmonicznych oraz wartość współczynnika odkształcenia THD_I

Najwyższym procentowym udziałem o średniej wartości na poziomie 70% charakteryzowała się harmoniczna trzeciego rzędu. W trakcie badania rejestrowano wyłącznie harmoniczne nieparzyste. Ich łączny udział powodował, że przeciętna wartość współczynnika odkształcenia prądu THD_I przekraczała 85%. W tabeli 1 zestawiono charakterystykę poszczególnych harmonicznych prądu oraz wyznaczonej jego wartości skutecznej.

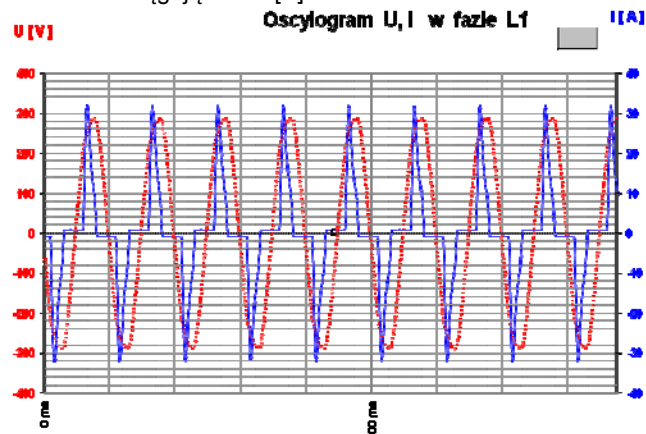
Spośród rejestrowanych wyższych harmonicznych największy udział miały harmoniczne rzędu 3 i 5. Ich średni udział w wartości skutecznej prądu wynosił odpowiednio 72 i 36%. Wykonana analiza pokazała, że wyższe harmoniczne niższego rzędu jak również wartość skuteczna prądu oraz współczynnik THD_I charakteryzowały się najniższą kilkuprocentową zmiennością. Najwyższą natomiast zmiennością na poziomie niespełna 30% i 20% charakteryzowała się odpowiednio wyższa harmoniczna rzędu 13 i 15 lecz ich

udział był bardzo niski i nie przekraczał 5% wartości skutecznej składowej podstawowej.

Tabela 1. Charakterystyka udziału wyższych harmonicznych prądu

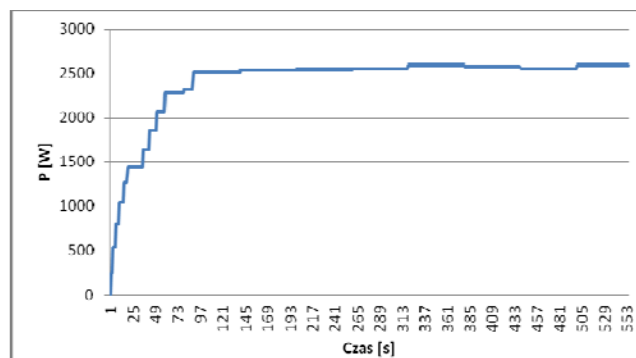
Parametr	Wartość:			współczynnik zmienności [%]
	min.	śr.	max.	
I _{h1} [A]	9,2	9,5	9,7	1,5
I _{rms} [A]	12,2	12,5	12,8	1,2
I _{h3} [%]	71,0	71,8	72,6	0,6
I _{h5} [%]	35,1	36,0	36,8	1,5
I _{h7} [%]	20,0	21,2	23,0	4,1
I _{h9} [%]	18,2	18,9	19,8	2,3
I _{h11} [%]	7,9	9,5	11,5	12,3
I _{h13} [%]	2,3	3,8	5,3	29,6
I _{h15} [%]	2,9	4,9	6,2	20,4
THD _I [%]	85,1	86,1	87,2	0,9

Wykorzystując wbudowany w analizator parametrów sieci oscyloskop zarejestrowano przebiegi czasowe napięcia oraz prądu podczas badania (Rys. 6). Dokonując wzrokowej oceny oscylogramu widzimy, że napięcie ma przebieg, który można uznać za sinusoidalnie zmienny. Prąd natomiast w czasie każdej połowki okresu płynie tylko w bardzo krótkim czasie wynoszącym ok. 3,5 [ms]. Pobór prądu w tak krótkim czasie powoduje, że jego wartości chwilowe osiągają aż 30 [A].



Rys. 6. Oscylogram przebiegów czasowych napięcia i natężenia prądu

Tak wysoki stopień odkształcenia przebiegu prądu (Tab. 1, Rys. 6) powodował, że wartość harmonicznej podstawowej prądu była średnio niższa od wyznaczonej wartości skutecznej prądu o ok. 24%. Wyznaczono więc krzywą przeciętną obciążenia badanego prototypowe stanowisko laboratoryjne w oparciu o wartość skuteczną prądu. Jego przebieg przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg obciążenia wyznaczony na podstawie wartości skutecznej prądu

Widzimy, że uwzględnienie udziału wyższych harmonicznych powoduje wzrost obciążenia mocą czynną o ok. 40%.

Wnioski

Zbudowane prototypowe stanowisko laboratoryjne spełnia wymagania norm [N1, N4]. Przeprowadzone badania próbne różnych popiołów na prototypowym stanowisku laboratoryjnym do badania topliwości popiołu metodą rurową wykazały, że zaproponowane rozwiązanie może być stosowane do:

- przybliżonego określenia temperatury topliwości popiołu, przy szybszym, odbiegającym od przyjętej normy, nagrzaniu próbki sprasowanego popiołu,
- prawie natychmiastowego ponownego przeprowadzenia badania kolejnej próbki popiołów, w nowej rurze grafitowej umieszczonej we wzbudniku, po wyjęciu rury wcześniej stosowanej.

Próbka sprasowanego popiołu podczas badania uzyskała zadaną temperaturę 1400 [°C] po czasie ok. 350 [s]. Zużycie energii elektrycznej do nagrzania stanowiska do temperatury powodującej topienie popiołu jest rzędu zaledwie 0,4 [kWh].

Negatywnym zjawiskiem występującym podczas pracy prototypowego stanowiska jest generowanie wyższych harmonicznych o rzędach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Podczas badań zaobserwowano dominujący udział harmonicznych nieparzystych, dla których współczynnika odkształcenia THD_i osiągał poziom ok. 85%.

Autorzy:

Dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 B, E-mail: krzysztof.necka@ur.krakow.pl

Dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 B, E-mail: stanislaw.lis@ur.krakow.pl

Dr inż. Tomasz Drózdź, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 B, E-mail: tomasz.drozd@ur.krakow.pl

Dr inż. Piotr Nawara, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 B, E-mail: piotr.nawara@ur.krakow.pl

Dr inż. Paulina Wrona, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 B, E-mail: paulina.wrona@ur.krakow.pl

Dr inż. Maciej Oziębłowski, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, 51-630 Wrocław, ul. J. Chelmońskiego 37, E-mail: Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl

NORMY

- [N1] DIN 51730 Testing of solid fuels - Determination of fusibility of fuel ash (Badanie paliw stałych - Określanie topliwości popiołów).
- [N2] ISO 1171:2010 Solid mineral fuels - Determination of ash (Stale paliwa mineralne – Określenie popiołu).
- [N3] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową.
- [N4] PN-82/G-04535 Paliwa stałe. Oznaczanie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.

LITERATURA

- [1] Gąsiorski A., Posyłek Z.; Nietypowe rozwiązanie indukcyjnego wysokoczęstotliwościowego pieca tyglowego, Przegląd Elektrotechniczny (ISSN 0033-2097), 2013, R. 89, Nr 12, s. 230-233.
- [2] Gąsiorski A., Posyłek Z.; Praktyczna realizacja rezonansowego falownika szeregowego pracującego z potrójną częstotliwością względem częstotliwości przełączania elementów, Przegląd Elektrotechniczny (ISSN 0033-2097), 2013, R. 89, Nr 12, s. 370-373.
- [3] Kalembsa D.; Ilość i skład chemiczny popiołu z biomasy roślin energetycznych. Acta Agrophysica (ISSN 1243-4125), 2006, Nr 7(4), s. 909-914.
- [4] Małkiński, W. Zając, J.; Wybrane problemy wizyjnej analizy właściwości termicznych materiałów przy wykorzystaniu analizatora do wyznaczania punktów charakterystycznych przemian fazowych, Elektronika (ISSN 0033-2089) 2013, vol. 54, Nr 4, s. 51-55.
- [5] Mitra-Kutno, Filtry i Kondensatory, Katalog Mitra Sp. z o. o., Kutno, wydanie 2014 r.
- [6] Mućko J.; Tranzystorowe falowniki napięcia z szeregowymi obwodami rezonansowymi, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy Rozprawy Nr 148, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego Bydgoszcz 2011, stron 206 (ISSN 0209-0597).
- [7] Prauzner, T., Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, s. 205-208, ISSN 0033-2097.
- [8] Prauzner, T., Ptak, P., Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 NR 12/2014, s.273-276, ISSN 0033-2097
- [9] Gąsiorski A., Posyłek Z., Drózdź T, Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, 1 (2015), 144-148