

Analiza funkcjonowania systemu pomiarowego pieca indukcyjnego w kontekście kompatybilności elektromagnetycznej

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę funkcjonowania systemu pomiarowego oporowego pieca indukcyjnego. Podczas wykonywania badań laboratoryjnych mających na celu wyznaczenie charakterystyki temperaturowej topliwości popiołu, zaobserwowano pojawianie się zakłóceń elektromagnetycznych, mających wpływ na rejestrowane wyniki pomiarów. Precyzyjne wyznaczenie temperatury płynięcia popiołu ma duże znaczenie w kontekście spalania biomasy w kotłach energetycznych, warunki prowadzonych badań opisuje norma PN-ISO540:2001.

Abstract. The article presents the problems of the resistance induction furnace measuring system. During the laboratory tests aimed at determining the temperature characteristics of ash fusibility, electromagnetic interference has been observed, affecting the recorded measurement results. The precise determination of the ash flow temperature is of great importance in the context of biomass burning in power boilers, the conditions of the conducted research are described in the PN-ISO540: 2001 standard. (Analysis of the operation of the induction furnace measurement system in the context of electromagnetic compatibility).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, oporowy piec indukcyjny, pomiar temperatury, system pomiarowy.

Keywords: electromagnetic compatibility, resistance induction furnace, temperature measurement, measuring system.

Wstęp

Dynamiczny rozwój elektroniki i wynikające z tego nasycenie urządzeń w przestrzeni pomiarowej powoduje zakłócanie sygnałów, wykorzystywanych m.in. w sterowaniu procesami. Zniekształcony sygnał (amplituda, częstotliwość) przekazuje fałszywe informacje, które mogą przyczynić się do uzyskiwania produktu nie spełniającego wymagań lub uszkodzenia maszyn na linii technologicznej [1-5].

Zaburzenia elektromagnetyczne można zaliczyć do obszernej grupy sygnałów niepożądanych, które w układach sterowania zawsze towarzyszą sygnałom użytecznym (pomiarowym, sterującym), wynikającym z celu ich działania. Charakter tych zaburzeń w funkcji czasu może przyjmować postać impulsu lub skoku wartości. Problematyką obejmującą tego typu zakłócenia zajmuje się kompatybilność elektromagnetyczna (ang. ElectroMagnetic Compatibility – EMC). Kompatybilność elektromagnetyczna jest gałęzią elektrotechniki związaną z nieprawidłowym działaniem sprzętu elektrycznego lub elektronicznego, spowodowaną na przykład polami lub zjawiskami elektrycznymi, magnetycznymi lub elektromagnetycznymi [2,6,7].

Najważniejszym zadaniem w realizacji założeń kompatybilności elektromagnetycznej przez urządzenia elektryczne jest poprawnie wykonany projekt oraz jego realizacja. Istotne jest również odpowiednie zestawienie urządzeń we wspólnym układzie sterowania, np. w postaci szafy elektrycznej, dobór czujników, ich umiejscowienie, ochrona oraz stosowanie filtrów przeciwzakłóceńowych. Projektantowi muszą być znane sposoby redukcji zakłóceń elektromagnetycznych, które mogą powstać wskutek wzajemnej współpracy kilku urządzeń elektrycznych, zestawionych we wspólnym układzie stanowiącym całość [8,9].

Emisja zakłóceń elektromagnetycznych i odporność na zakłócenia są regulowane na całym świecie przez stosowne uwarunkowania prawne. Stąd m.in. obowiązki producentów, importerów i dystrybutorów związane ze sprzedażą sprzętu elektromagnetycznego zostały określone w dyrektywie obowiązującej na terenie Unii Europejskiej EMC 2014/30/UE. Celem tej dyrektywy jest określenie zasad funkcjonowania zestawionych ze sobą urządzeń w określonym środowisku. Ma ona zastosowanie tylko do

aparatury, a nie do pól elektromagnetycznych i ich efektów, np. na ludziach. Systemy radiowe i końcowe urządzenia telekomunikacyjne nie są objęte dyrektywą EMC 2014/30/UE, ale są przedmiotem innej dyrektywy [10,11].

Zgodnie z powyższymi zaleceniami urządzenia elektryczne muszą być budowane w taki sposób, aby podczas eksploatacji:

- generowane przez te wyposażenie zakłócenia elektromagnetyczne nie przekraczały poziomu, powyżej którego urządzenia radiowe i telekomunikacyjne lub inne urządzenia mogłyby nie działać zgodnie z przeznaczeniem;
- posiadały poziom odporności na zakłócenia elektromagnetyczne, których można się spodziewać w zamierzonym zastosowaniu, co pozwalałoby wyposażeniu działać bez niedopuszczalnego pogorszenia jego zamierzonego użytkowania [3,8].

Analizując powyższe zalecenia można zauważyć, że kompatybilność elektromagnetyczna wyraża zdolność danego urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym i nieemitowanie zaburzeń pola elektromagnetycznego zakłócającego poprawną pracę innych urządzeń pracujących w tym środowisku. Przyczyną zaburzeń mogą być okresowe i przypadkowe (losowe) zmiany napięć zasilających ale również szybkie zmiany prądów i napięć w obwodach elektrycznych w obecności indukcyjności i pojemności. Zakłócenia mogą powstawać poprzez przenikanie sygnałów z jednych obwodów do innych, co ma miejsce szczególnie między liniami łączącymi te obwody – między liniami transmisji sygnałów, występowanie w obwodach elektrycznych sprzężeń (możliwość generacji), pojawienie się w obwodach zwarcia i wystąpienie uszkodzenia elementów lub układów, szumy elementów aktywnych i pasywnych [11,12]. Opisowana sytuacja ma miejsce w przypadku sterowania piecem indukcyjnym do określania topliwości popiołu w warunkach laboratoryjnych. Problematykę procedur badawczych pomiaru temperatury płynięcia popiołu opisują stosowne normy [N1, N2]. Przekroczenie tej temperatury podczas procesu spalania paliwa w kotle powoduje zalanie rusztu płynnym popiołem (szlaką), co eliminuje piec z dalszej eksploatacji do czasu jej usunięcia [13,14]. Należy zauważyć, że temperatura płynięcia popiołu jest

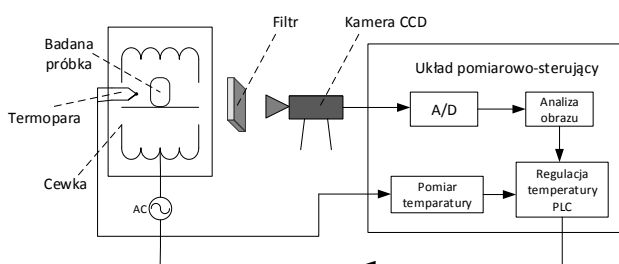
zróżnicowana w zależności od materiału wsadowego, przeznaczonego do spalania. Obecnie elektrociepłownie zobligowane są do spalania biomasy, która charakteryzuje się dużą niejednorodnością oraz zróżnicowanym składem fizykochemicznym. Dla każdej partii takiego paliwa konieczne jest precyzyjne określenie tej temperatury, a wynik pomiaru zależy m.in. od poprawnego funkcjonowania systemu pomiarowego. Aby uzyskać rzetelne informacje, czujnik temperatury, musi być umieszczony blisko spalanej próbki w piecu laboratoryjnym. To z kolei oznacza, że znajduje się w środku cewki indukcyjnej, gdzie najbardziej narażony jest na wpływ pola elektromagnetycznego.

Stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu

Prototypowe urządzenie do badania topliwości popiołu (temperatura płynięcia popiołu) wykorzystuje procesu grzania oporowego. Jego cechą charakterystyczną jest duża stała czasowa procesu nagrzewania (oraz procesu ochładzania), co ułatwia sterowanie procesem spalania próbek zgodnie z normą PN-ISO 540:2001. Zasada działania wykorzystuje zjawisko rezonansu elektrycznego i wysokoczęstotliwościowego grzania indukcyjnego. Piec 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. Kilkuwojowy wzbudnik wykonany jest z przewodzącej rurki chłodzonej wodą w obiegu zamkniętym, kumuluje on energię pola elektromagnetycznego w przewodzącej rurze grafitowej [13-15].

Parametry techniczne urządzenia grzejnego 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 złożonej z kondensatorów typu HC-03 o pojemności całkowitej $C_{rs}1,6$ [μ F]. Wymiary wzbudnika: średnica zewnętrzna 70 [mm], długość 45 [mm], wzbudnik wykonano z rurki miedzianej o średnicy 6 [mm] o 6 zwojach. Urządzenie może wytworzyć temperaturę do 1500 [°C].

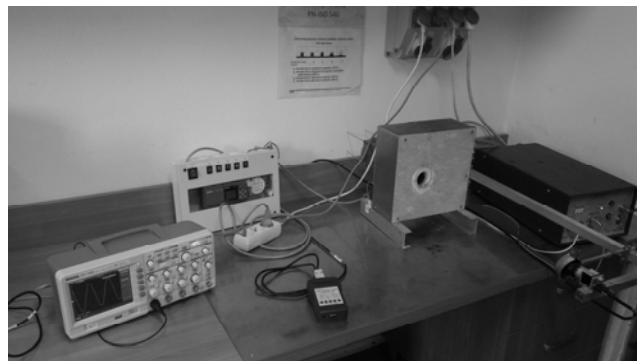
Za pomiar temperatury odpowiedzialna jest termopara typu S PtRh-Pt (platynarod/platyna) o temperaturze pracy do 1600 [°C]. Celem uzyskania precyzyjnej rejestracji temperatury spalania próbki, czujnik temperatury umieszczony jest wewnątrz rury grafitowej. Schemat blokowy funkcjonowania systemu kontrolno-sterującego zobrazowano na rysunku 1.



Rys.1. Schemat blokowy systemu sterowania piecem do badania topliwości popiołu

Rysunek 2 przedstawia stanowisko badawcze, piec znajduje się z prawej strony, sterowanie procesem spalania próbek biomasy realizowana jest za pomocą sterownika PLC (w głębi zdjęcia). Ponadto widoczne są: przyrząd do pomiaru pola magnetycznego oraz oscyloskop cyfrowy, na których dokonywano pomiarów sygnałów zakłócających

funkcjonowanie systemu pomiarowego, a generowanych przez piec.



Rys.2. Piec oporowy wraz z układem sterowania oraz urządzeniami pomiarowymi

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu działania oporowego pieca indukcyjnego na funkcjonowanie systemu pomiarowego.

Zakres prac obejmował pomiary temperatury wewnątrz elementu roboczego (rury grafitowej) oraz pomiary natężenia pola magnetycznego i rejestracja charakterystyki napięcia sieciowego w trakcie pracy pieca.

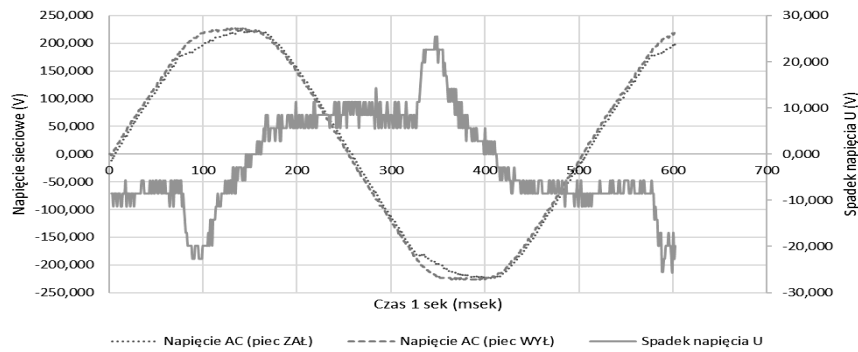
Metodyka prowadzenia badań doświadczalnych

Pomiary podstawowych wielkości fizycznych i elektrycznych, pozwalających na analizę eksploatacyjną pieca indukcyjnego, przeprowadzono z zastosowaniem następującej aparatury:

- rejestrację charakterystyki napięcia sieciowego przeprowadzono z zastosowaniem oscyloskopu cyfrowego Rigol;
- temperaturę wewnątrz pieca indukcyjnego mierzono za pomocą termopary typu S, a wyniki rejestrowano z zastosowaniem karty pomiarowej Advantech PCI-1710 o szybkość przetwornika analogowo-cyfrowego 100 [kS/s] oraz rozdzielczości 12 bitów);
- pomiar pola magnetycznego panującego w bezpośrednim sąsiedztwie komory roboczej pieca (smart magnetic sensor SMS 102).

Analiza wyników badań eksploatacyjnych

Przeprowadzona z zastosowaniem oscyloskopu analiza napięcia sieciowego sinusoidalnie zmiennego 230VAC (rys. 3) wykazała, że w czasie pracy pieca indukcyjnego dochodzi do spadków napięcia o maksymalnej wartości 27 [V] (średnio 15 [V]). Przedstawione na wykresie wyniki pomiarów oscyloskopowych dotyczą napięcia skutecznego. Największe spadki notowano w chwili uruchamiania pieca. Przeprowadzono dwadzieścia serii pomiarowych, podczas których uzyskiwano powtarzalne wyniki. Zarejestrowane spadki napięcia mogą wpływać niekorzystnie na zasilanie systemu pomiarowego, ponieważ przekłada się to na spadek wartości napięcia zasilającego przetwornik termopary. Ponadto zauważono porównując wyniki pomiarów z normami dotyczącymi instalacji elektroenergetycznych że dochodzi do spadków napięcia sięgających średni 6,5%, a maksymalnie do 11%. Zgodnie z normą: PN-HD 60364-5-52:2011, dotyczącą projektowania instalacji zlecane jest, by spadek napięcia pomiędzy złączem instalacji a urządzeniami odbiorczymi nie przekraczał 4% znamionowego napięcia zasilania [N1]. Jedynie w przypadku rozruchu silników dopuszczalny jest spadek napięcia większy niż 4%.



Rys.3. Charakterystyka napięcia sieciowego 230 VAC w trakcie eksploatacji pieca laboratoryjnego (jeden okres zmian)

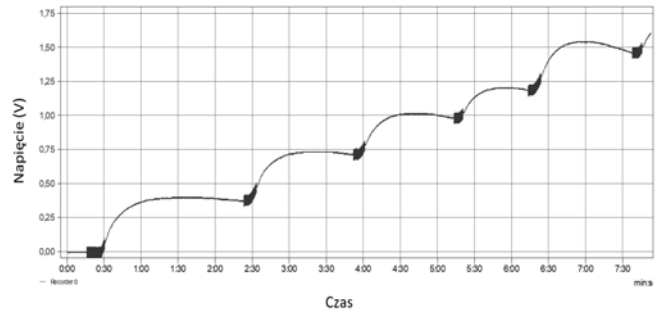
Pomiary pola magnetycznego przeprowadzono z zastosowaniem przyrządu widocznego na rysunku 3.



Rys.4. Miernik natężenie pola magnetycznego SMS 102

Wykonano kilkadziesiąt pomiarów, z których uzyskano następujące wyniki: natężenie pola magnetycznego w bliskiej okolicy pieca (na zewnątrz – odległość ok. 10 [cm]) wynosiło w chwili uruchamiania 24 [mT] oraz średnia wartość w czasie pracy 14 [mT]. Ponadto mierzono pole magnetyczne wewnątrz pieca, w bliskiej odległości od termopary (2 cm). Z uwagi jednak na niebezpieczeństwo uszkodzenia sondy (wysoka temperatura) były to krótkotrwałe pomiary, przeprowadzone na zimnym piecu przy jego rozruchu. Zarejestrowano wtedy wartości sięgające 180 [mT].

Najistotniejszym parametrem wynikającym z funkcjonowania laboratoryjnego pieca do określania topliwosci popiołu jest temperatura płynięcia popiołu. Stąd przeprowadzono analizę funkcjonowania systemu pomiarowego z rejestracją tej wielkości fizycznej. W trakcie prowadzenia powyższych badań doświadczalnych piec rozgrzewał się od 20 [°C] do 1600 [°C]. Zastosowany przetwornik pomiarowy do współpracy z termoparą tyku S generował odpowiednio do powyższych temperatur sygnał napięcia prądu stałego w zakresie 0 – 10 [VDC]. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę sygnału pomiarowego przed zastosowaniem filtrów eliminujących zaszumienie.

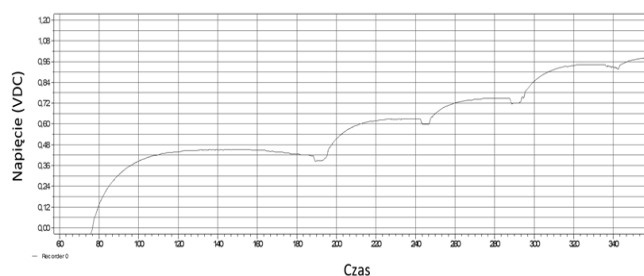


Rys.5. Charakterystyka sygnału pomiarowego przed zastosowaniem filtracji

Zaprogramowany na sterowniku PLC układ sterowania stopniowo podnosi temperaturę, zgodnie z algorytmem zawartym w dokumencie normalizacyjnym, a szczegółowo opisanym w pracy autorów [16]. Zauważono, że zastosowanie klasycznego układu regulacji analogowej PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkującej) do sterowania natężeniem prądu zasilającego piec jest niemożliwe z uwagi na jego konstrukcję. Minimalna wartość prądu zasilającego cewkę wynosi 3,3 [A], a to powoduje za szybki przyrost temperatury. Stąd zastosowano regulator dwustawny z pętlą histerezy. Wartości progowe do załączenia i wyłączenia cewki zmieniają się w funkcji czasu tak, aby uzyskać pożądany przyrost temperatury. Szczególnie ważny jest powolny przyrost powyżej wartości 700 [°C] pozwalający na precyzyjną rejestrację zmiany kształtu badanej próbki popiołu. Praca pieca widoczna jest na wykresie w postaci pogrubionych linii, a wynikających z zakłóceń generowanych do sieci elektroenergetycznej zasilającej piec, jak również wpływu na funkcjonowanie termopary. Autorzy przypuszczają również, że w czasie pracy pieca na przewodach termopary może indukować się dodatkowa SEM. Oscylacje sygnału pomiarowego, który pełni rolę wielkości regulowanej w układzie automatyki wpływały również na jego funkcjonowanie. Zaobserwowano, że układ wpadał w oscylacje, naprzemienne, z dużą częstotliwością włączał i wyłączał piec za pośrednictwem przekaźnika. Celem ich ograniczenia zwiększono histerezę włączania pieca ale to powodowało znaczne spadki temperatury. Jest to widoczne na rysunku, linia sygnału pomiarowego ulega zakrzywieniu w dół po każdym wyłączeniu pieca. Dalsze zwiększanie histerezy powodowało jeszcze większe spadki, więc zrezygnowano z tej metody ograniczania częstego przełączania pieca [17-18].

Na rysunku 6 zamieszczono wykres przefiltrowanego sygnału. Widoczne są wyraźne spadki wartości sygnału pomiarowego z termopary, przypuszczalnie wynika to ze spadków napięcia w układzie zasilania przetwornika. Na

podstawie otrzymanych wyników pomiarów, oszacowano, że błąd pomiaru może sięgać 30 [°C] w chwili załączenia pieca indukcyjnego.



Rys.6. Charakterystyka sygnału pomiarowego po zastosowaniu filtracji

W trakcie realizacji badań zauważono również, że istotny wpływ na wartość uzyskiwanej temperatury spalania próbek popiołu ma stopień wypalenia (zużycia rury grafitowej) umieszczonej wewnątrz cewki. Stanowi ona komorę spalania oraz zapewnia neutralne środowisko gazowe. Pełna sprawność układu osiągana jest w dwóch kolejnych pomiarach, następnie wartość maksymalnej temperatury spada o ok. 100 [°C].

Podsumowanie

Przedstawiona analiza eksploatacyjna oporowego pieca indukcyjnego, służącego do laboratoryjnego określania temperatury płynięcia popiołu wykazała, że urządzenie to wpływa na jakość zasilania energetycznego w laboratorium ale nie przekracza dopuszczalnych wartości. Zauważono, że pojawiają się spadki napięcia sięgające do 11% napięcia skutecznego występującego w sieci 230 VAC. Badania doświadczalne polegające na określeniu wpływu tych zakłóceń na system pomiarowy wykazały istotne problemy polegające na zafałszowaniu wyników pomiarów, jak również negatywnie wpływały na układ sterowania. Występujące zaszumienie sygnału pomiarowego można wyeliminować wprowadzając histerezę nieczułości w algorytmie sterowania piecem indukcyjnym zaprogramowanym na sterowniku PLC, ponadto w oprogramowaniu przeznaczonym do rejestracji sygnału wprowadzono filtrację zakłóceń.

Autorzy: dr inż. Marcin Tomasiak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: marcin.tomasik@urk.edu.pl

dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116ba, 30-149 Kraków, E-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl

dr hab. inż. Bogusława Łapczyńska-Kordon, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, ul. Balicka 116ba, 30-149 Kraków, E-mail: boguslawa.lapczynska-kordon@urk.edu.pl

doc. ing. Juraj Maga, Slovak University of Agriculture in Nitra, Faculty of Engineering, Department of Machines and Production Biosystems, ul. Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, juraj.maga@uniag.sk

NORMY

[N1] PN-HD 60364-5-52:2011 Instalacje elektryczne niskiego napięcia -- Część 5-52: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego - Oprzewodowanie

[N2] PN-ISO 540:2001 Paliwa stałe, Oznaczanie topliwości popiołu w wysokiej temperaturze metodą rurową.

[N3] PN-82/G-04535 Paliwa stałe. Oznaczanie charakterystycznych temperatur topliwości popiołu.

LITERATURA

- [1] Krawczyk A., Bioelektromagnetyzm, Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu, Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK Warszawa (2002)
- [2] Akagi H. and Nabae A., The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions, *European Trans. on Electrical Power*, 3 (1993), No.1, 27-31
- [3] Akagi H., New trends in active filters for power conditioning, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 32 (1996), No. 6, 1312-132
- [4] Kasprzyk L.: Optimization of Lighting Systems with the use of the Parallelized Genetic Algorithm on Multi-Core Processors using the .NET Technology, *Przegląd Elektrotechniczny* 2012 vol. 88 (7B), 131-133
- [5] Kasprzyk L., Bednarek K.: The selection of hybrid energy storage for electrical vehicle, *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, Vol. 1, No. 12, 129-132,
- [6] Bienkowski P. Zubrzak B., Pomiary modulowanych pól elektromagnetycznych – możliwości i ograniczenia, *Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne*. 85 (2012), nr.8/9, 865-872
- [7] Zubrzak B., Bieńkowski P., 50 Hz pulse magnetic field measurements – metrological possibilities of magnetic field meters, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr.1, 121-124
- [8] Duraj A., Korzeniewska E., Krawczyk A., Classification algorithms to identify changes in resistance, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015) nr.12, 80-82
- [9] Pawlak, R., Korzeniewska, E., Konecny, C., Hałgas, B.: Properties of thin metal layers deposited on textile composites by using the PVD method for textronic applications, *Autex Research Journal* Vol. 17, No 3, 2017, 229-237
- [10] Gryz K., Karpowicz J., Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy. *Monografia z serii: Zarządzanie Bezpieczeństwem i Higieną Pracy*. Warszawa, CiOP (2000)
- [11] Kubacki R., Uwarunkowania biofizyczne oraz dopuszczalne wartości elektromagnetycznego promieniowania impulsowego. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* (2008) nr.4
- [12] Kandyba A., Kalus M., Kurytnik I.P., Synthesis and simulation of stator rms voltage control circuit of cage induction machine operating as generator in small hydropower plant supplying offgrid customers, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012) nr.6, 138-141
- [13] Gąsiorowski A., Posyłek Z., Drózd T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.1, 144-148
- [14] Gąsiorowski A., Posyłek Z., Nietypowe rozwiązanie indukcyjnego wysokoczęstotliwościowego pieca tyglowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.12, 230-233
- [15] Nęcka K., Lis S., Drózd T., Nawara P., Wrona P., Oziembłowski M., Charakterystyka prototypowego stanowiska laboratoryjnego do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.1, 109-113
- [16] Tomasiak M., Lis S., Nęcka K., Oziembłowski M., Kiełbasa P., Drózd T., Nawara P., Ostafin M., Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2016), nr.12, 173-177
- [17] Śmierciak P., Ziółkowski E., Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym. *Archives of foundry engineering*, 4 (2014), vol. 14, s. 123-126
- [18] Lis S., Tomasiak M., Nęcka K., Oziembłowski M., Nawara P., Kiełbasa P., Ostafin M., Drózd T., Analiza wpływu sygnału zakłócającego na jakość klasycznego i neuronowo-rozmytego sterowania piecem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.12, 89-92.