

Bolesław Karwat
Marek Nocun¹
Ryszard Machnik
Jerzy Niedźwiedzki

AGH-Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
al. Mickiewicza 30,30-059 Kraków,

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

¹Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

E-mail: karwat@agh.edu.pl, nocun@agh.edu.pl, machnik@agh.edu.pl, jniedz@agh.edu.pl

Modelowanie i badania wpływu wybranych cech konstrukcyjnych na parametry eksploatacyjne elektrofiltrów przemysłowych

Słowa kluczowe: elektrofiltr, eksploatacja, elektrody ulotowe, modelowanie, symulacja, funkcja sigmoidalna.

Streszczenie: Elektrofiltry są obecnie najczęściej stosowanymi, w procesach przemysłowych, urządzeniami do redukcji emisji pyłów do atmosfery. Znaczący wpływ na przebieg procesu odpylania ośrodka dwufazowego gaz/pył ma kształt oraz konfiguracja elektrod emisyjnych, wpływające na ukształtowanie pola elektrycznego w komorze elektrofiltru. Parametry geometryczne elektrod ulotowych oraz ich rozmieszczenie w komorze elektrofiltru powinny zapewniać równomierny rozkład gęstości prądu na powierzchni jego elektrod zbiorczych. W artykule przedstawiono analizę wpływu geometrii oraz konfiguracji przemysłowych elektrod ulotowych typu ostrzowego na rozkład gęstości prądu na elektrodzie zbiorczej. Na podstawie wyników pomiarów opracowano model matematyczny umożliwiający symulację rozkładu gęstości tego prądu w zależności od kształtu elektrod. Model umożliwia określenie korzystnych wartości odległości pomiędzy elementami emisyjnymi elektrody ulotowej oraz odległości pomiędzy tymi elektrodami. Korzystne parametry geometryczne i konfigurację elektrod ulotowych określano na podstawie analizy magnitud gęstości widmowej mocy (PSD) oraz wartości średniokwadratowej (RMS) gęstości prądu. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zmniejszenia ilości elementów emisyjnych elektrod ulotowych bez pogorszenia parametrów eksploatacyjnych elektrofiltru.

1. Wstęp

Elektrostatyczna metoda oczyszczania spalin jest powszechnie stosowana w energetyce ciepłownictwie, hutnictwie, przemysłach: chemicznym, cementowym oraz papierniczym [20]. Głównym sektorem gospodarki, w którym znalazły zastosowanie elektrostatyczne urządzenia odpylające, jest energetyka, wykorzystująca elektrofiltry w procesach oczyszczania gazów powstających w procesie spalania różnego typu paliw [17]. Powstające w wyniku spalania paliw w kotłach energetycznych spaliny zawierają znaczne ilości pyłu. W przemyśle energetycznym, ze względu na ilość powstających podczas wytwarzania energii spalin, jedynym uzasadnionym względami ekonomicznymi rozwiązaniem jest oczyszczanie gazów za pomocą elektrofiltrów płytowych o konstrukcji poziomej.

Elektrofiltry są konstrukcjami przystosowanymi do pracy w ściśle określonej instalacji energetycznej. Dobór konstrukcji elektrofiltru, zastosowane w nim elektrody ulotowe i zbiorcze [1, 2] oraz system zasilania zdeterminowane są przez typ kotła i rodzaj spalnego w tym kotle paliwa, a w konsekwencji własności powstających pyłów, które są w tym elektrofiltrze separowane. Na etapie projektowania elektrofiltru określa się jego podstawowe parametry eksploatacyjne tj. parametry gwarantowane oraz graniczne określające własności:

- paliwa (m.in. skład pierwiastkowy, zawartość siarki, wartość energetyczną, zawartość popiołu),
- spalin (minimalne oraz maksymalne natężenie przepływu, wilgotność, temperaturę, temperaturę punktu rosy, zawartość CO₂ oraz O₂),
- separowanego pyłu (stężenie nominalne oraz maksymalne, zawartość części palnych).

Zadaniem elektrofiltru jest separacja ze spalin zawartej w nich fazy pyłowej, z tego względu najbardziej istotnym parametrem eksploatacyjnym jest wartość emisji pyłu na jego wyjściu. Dla nowo budowanych obiektów, w zależności od stosowanego paliwa poziom

stężenia zanieczyszczeń na wyjściu elektrofiltru nie może przekraczać: dla węgla kamiennego lub brunatnego $5\div 15 \text{ mg/m}^3$, zaś dla biomasy oraz torfu $5\div 20 \text{ mg/m}^3$ spalin suchych w warunkach umownych (zawartość pary wodnej nie większa niż 5 g/kg gazów odlotowych, w warunkach referencyjnego tlenu $\text{O}_2=6\%$). Oznacza to, że przykładowo dla stężenia pyłu w spalinach ze spalania węgla kamiennego $s_p=26 \text{ g/m}^3$ skuteczność odpylania elektrofiltru musi wynosić $99,96\%$.

Cechy paliwa, własności spalin oraz ilość zawartego w nich pyłu determinują dobór rozwiązania konstrukcyjnego elektrofiltru:

- wymiary, liczbę sekcji oraz stref odpylania, czynną wysokość oraz długość pola elektrycznego, liczbę zasilaczy oraz niezależnie zasilanych pól elektrofiltru itp.,
- nominalną prędkość przepływu gazów (ok. 1 m/s),
- spadek temperatury oraz ciśnienia gazu w elektrofiltrze (odpowiednio: $5\div 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $120\div 150 \text{ Pa}$),
- układ, typ i liczba elektrod ulotowych oraz zbiorczych,
- typ oraz liczba zastosowanych strzepywaczy elektrod zbiorczych i ulotowych.

W trakcie pracy w warunkach ustalonych podstawowym parametrem eksploatacyjnym elektrofiltru są parametry elektryczne wynikające z typu zastosowanych zasilaczy wysokiego napięcia tj. napięcie oraz prąd nominalny. Obecnie stosuje się zasilacze o parametrach wyjściowych prąd/napięcie odpowiednio: $400\div 2000 \text{ mA}$, $80\div 135 \text{ kV}$. Na spełnienie wymogów odnośnie emisji pyłu na wyjściu elektrofiltru istotny wpływ mają:

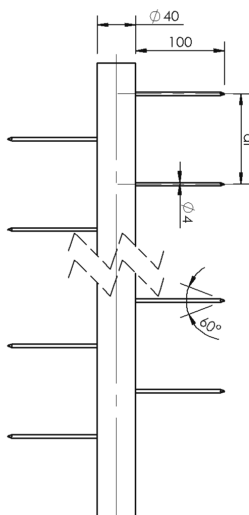
- napięcie zasilania elektrod ulotowych,
- dobór nastaw regulatora zespołu zasilającego wysokiego napięcia (tryb pracy),
- częstotliwość strzepywania pyłu osadzanego na elektrodach zbiorczych oraz ulotowych.

Znaczący wpływ na przebieg procesu osadzania pyłu na elektrodach zbiorczych elektrofiltru ma kształt i konfiguracja elektrod ulotowych wpływająca na ukształtowanie rozkładu gęstości pola elektrycznego w komorze elektrofiltru. Gęstość prądu na powierzchni elektrody zbiorczej wpływa na własności mechaniczne warstwy osadzonego pyłu na powierzchni elektrody zbiorczej. Na wartość gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej mają wpływ emisyjność elektrody oraz konduktancja ośrodka dwufazowego obecnego w przestrzeni międzyelektrodowej dla określonej konfiguracji elektrod. W procesie eksploatacji elektrofiltru oba te parametry ustala się, przez dobór napięć zasilania elektrod ulotowych oraz trybu pracy zasilaczy wysokiego napięcia, na poziomie zapobiegającym zjawisku migracji ziaren pyłu oderwanych od powierzchni elektrody zbiorczej do dalszych stref elektrofiltru.

W okresie ostatnich 20 lat nastąpiły istotne zmiany w konstrukcji elektrod ulotowych elektrofiltrów. Ze względu na niską trwałość zrezygnowano z elektrod drutowych i taśmowych. Niewątpliwą zaletą tego typu elektrod był równomierny, stosunkowo łatwy do obliczenia rozkład wytwarzanego przez nie pola elektrostatycznego. Obecnie stosowane są elektrody masztowe wyposażone w punktowe elementy emisyjne w postaci ostrz. Skomplikowany rozkład pola elektrycznego wokół takich elektrod uniemożliwia stosowanie w analizie teoretycznej modeli matematycznych opracowanych dla elektrod drutowych.

Rozwój technik informatycznych umożliwił zastosowanie metod numerycznych do modelowania zjawisk zachodzących w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltru [3, 4, 5, 9, 11, 12, 23]. Kolejny krok w rozwoju metod komputerowej symulacji procesu separacji pyłu w elektrofiltrach stanowiły próby opracowania modeli zastępczych elektrod ulotowych [7, 21]. Duże znaczenie dla ilościowego określenia zjawisk zachodzących podczas wyładowania w środowisku gazów (stopnia ich jonizacji wyznaczonej z funkcji rozkładu energii elektronów) oraz szybkości propagacji wyładowania koronowego mają wyniki prac z zakresu fizyki plazmy [10]. Komputerowa symulacja parametrów pola elektrycznego i jego wpływu na proces separacji pyłu, napotyka na trudność wynikającą ze skomplikowanej geometrii stosowanych obecnie elektrod ulotowych. Z tego względu nadal prowadzone są badania doświadczalne, na podstawie których można wnioskować o przebiegu procesu odpylania ośrodka dwufazowego, jakim są spaliny [13, 14].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych dla przemysłowych elektrod ulotowych typu ostrzowego. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego elektrody tego typu przedstawiono na rys. 1.

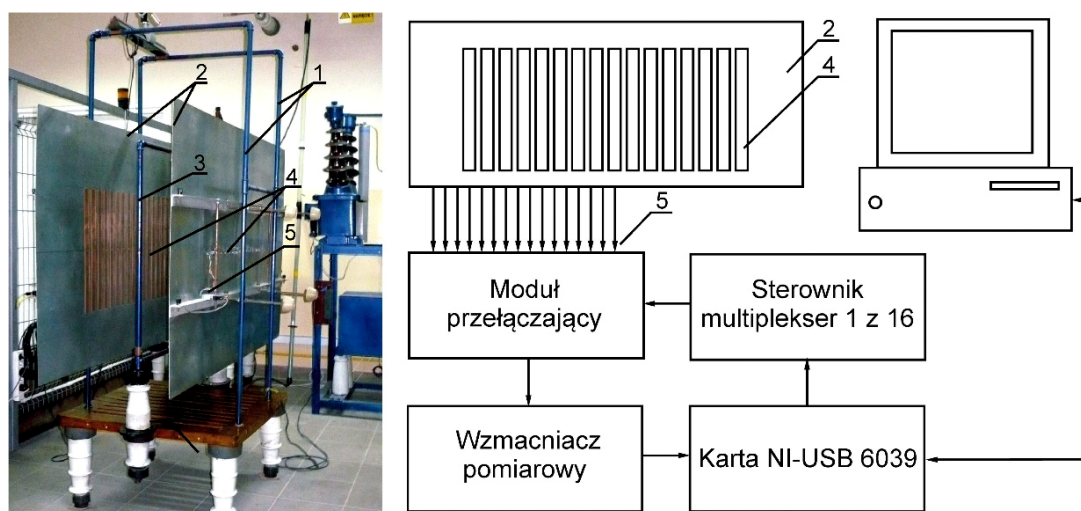


Rys. 1. Elektroda masztowa typu ostrzowego

Masztowa elektroda ostrzowa składa się z masztu nośnego o średnicy około 40 mm, stanowiącego jej rdzeń oraz z elementów emisyjnych, którymi są pręty stalowe o średnicy 4 mm i długości 100 mm przyspawane do masztu po jego przeciwnych stronach w odpowiednich odstępach. Elementy emisyjne zakończone są graniastymi ostrzami.

2. Metodyka badań

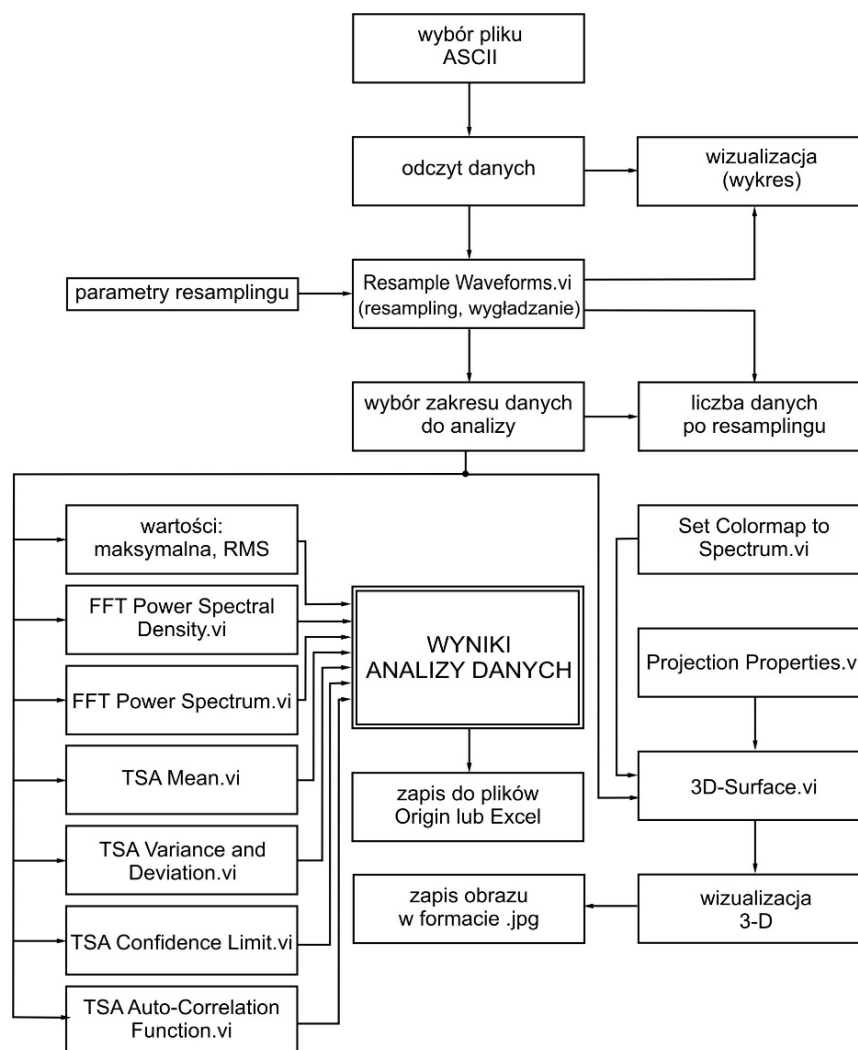
Pomiary parametrów elektrycznych elektrod ulotowych wykonano na stanowisku, którego widok wraz ze schematem blokowym obwodów pomiarowych przedstawiono na rysunku 2 [16]. Stanowisko pomiarowe o wysokości czynnej elektrod zbiorczych $h = 1,0$ m i maksymalnej podziałce międzyelektrodowej elektrod zbiorczych $H_Z = 0,6$ m umożliwia badania przemysłowych elektrod ulotowych o długości do 0,8 m. Składa się ono z ram nośnych (1), do których zamocowane są elektrody zbiorcze (2) o sumarycznej powierzchni 4 m^2 . Badana elektroda ulotowa jest mocowana do izolowanej wewnętrznej ramy nośnej (3) zasilanej prądem stałym z zasilacza wysokiego napięcia. Sygnały pomiarowe z czujników pomiarowych (4) przesyłane są poprzez złącza (5) do systemów pomiaru i akwizycji danych.



Rys. 2. Stanowisko do wyznaczania parametrów elektrod ulotowych 1 – ramy nośne, 2 – elektrody zbiorcze, 3 – rama nośna elektrod ulotowych, 4 – czujniki pomiarowe, 5 – złącza pomiarowe

Pomiar rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej dokonywany jest za pomocą szesnastu pól pomiarowych (4) rozmieszczonych na długości elektrody zbiorczej ze stałym odstępem pomiędzy polami. Prądy płynące pomiędzy każdym z pól pomiarowych a masą podawane są sekwencyjnie przez multiplekser 1 z 16 do wzmacniacza pomiarowego. Rejestracja danych oraz sterowanie pracą multipleksera dokonywane są za pomocą opracowanego w tym celu oprogramowania z wykorzystaniem pakietu LabView. Rejestrowana wartość napięcia uzyskiwana jest poprzez uśrednienie 2000 próbek dla każdego z pól pomiarowych. Dane rejestrowane są w cyklu pięciokrotnym, co oznacza, że mierzona wartość prądu, odpowiadająca wartości prądu płynącego przez każde z pól pomiarowych, jest wartością średnią z 10 000 pomiarów.

Opracowanie wyników pomiarów parametrów elektrycznych elektrod przeprowadzono wykorzystując narzędzia do analizy szeregów czasowych. Zastosowanie statystycznych metod analizy szeregów czasowych powoduje uproszczenie opracowania wyników uzyskanych w pomiarze parametrów elektrycznych badanych elektrod. Daje również informacje o badanym obiekcie, których nie można uzyskać innymi metodami. Do analizy rozkładu prądu na powierzchni elektrody zbiorczej elektrofiltrowano metodologię badań statystycznych opartych na formalizmie modelowym szeregów czasowych [6]. Analizę rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej przeprowadzono, wykorzystując opracowany do tego celu program wraz z zaawansowanymi funkcjami statystycznymi, służącymi do analizy szeregów czasowych *TSA (Time Series Analysis)* oprogramowania LabView [24]. Uproszczony algorytm programu do analizy danych pomiarowych wraz z zawartymi jego strukturze procedurami LabView przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Algorytm programu do analizy pomiarów rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej

Program ten po wstępnym przetworzeniu danych pomiarowych umożliwia ich wygładzenie i wyznaczenie dla analizowanego przebiegu:

- wartości średniej z eliminacją wartości ekstremalnych,
- wartości średniokwadratowej *RMS (Root MeanSquare)*,
- magnitudy widma mocy *PS (Power Spectrum)* wyznaczanej z zastosowaniem algorytmu szybkiej transformaty Fouriera *FFT (Fast Fourier Transform)*, gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej w postaci wartości kwadratów *RMS*,
- gęstości widmowej mocy *PSD (Power Spectrum Density) FFT* szeregu czasowego *Xt* (w postaci wartości kwadratów *RMS* na jednostkę osi *x* elektrody zbiorczej).

Do obliczeń widma mocy oraz gęstości widmowej mocy wykorzystano procedury zawarte w bibliotekach funkcji wbudowanych programu LabView.

Badania procesu separacji pyłu przy zastosowaniu przemysłowych elektrod ulotowych oraz elektrod o zmienionej geometrii prowadzono w elektrofiltrze laboratoryjnym (rys.4) o następujących parametrach:

- długość czynna komory: 2 m,
- wysokość komory: 1 m,
- podziałka międzyelektrodowa: 400 mm lub 500 mm,
- elektrody zbiorcze: płaskie,
- elektrody ulotowe: wymienne, dobierane do konkretnych pomiarów,
- prędkość przepływu gazu: od 0,1 m/s do 0,8 m/s,
- źródło pyłu: komora fluidyzacyjna zasilana ze źródła sprężonego powietrza,
- podawanie pyłu: system dysz, usytuowanych pionowo w obszarze wlotu elektrofiltru.



Rys. 4. Widok elektrofiltru laboratoryjnego ze zdjętą elektrodą zbiorczą 1 – podajnik pyłu, 2 – dyfuzor, 3 – rama nośna elektrod ulotowych, 4 – elektroda ulotowa, 5 – konfuzor, 6 – elektroda zbiorcza

Elektrody ulotowe elektrofiltru były zasilane prądem stałym z zasilacza wysokiego napięcia umożliwiającą płynną regulację napięcia od 0 do 75 kV.

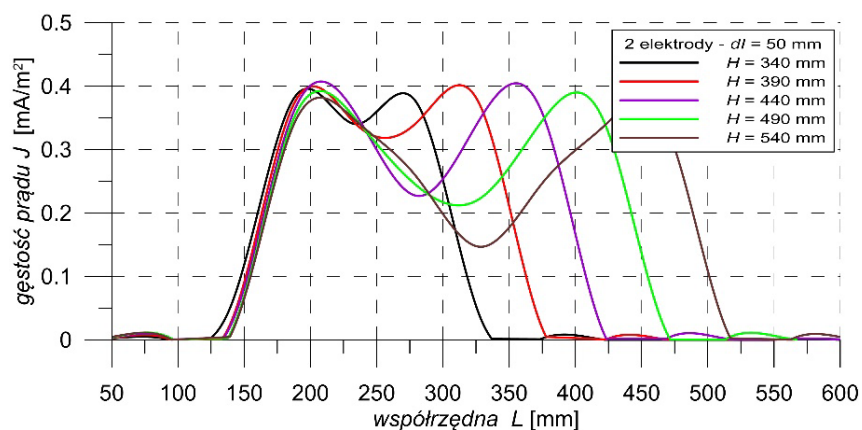
Przepływ powietrza przez komorę elektrofiltru był uzyskiwany poprzez zastosowanie wentylatora odciągowego zasilanego poprzez przemiennik częstotliwości. Zmiana prędkości obrotowej silnika umożliwia zmianę wydajności wentylatora, a więc prędkości przepływu powietrza przez komorę elektrofiltru.

3. Wyniki badań

3.1. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych elektrod ulotowych

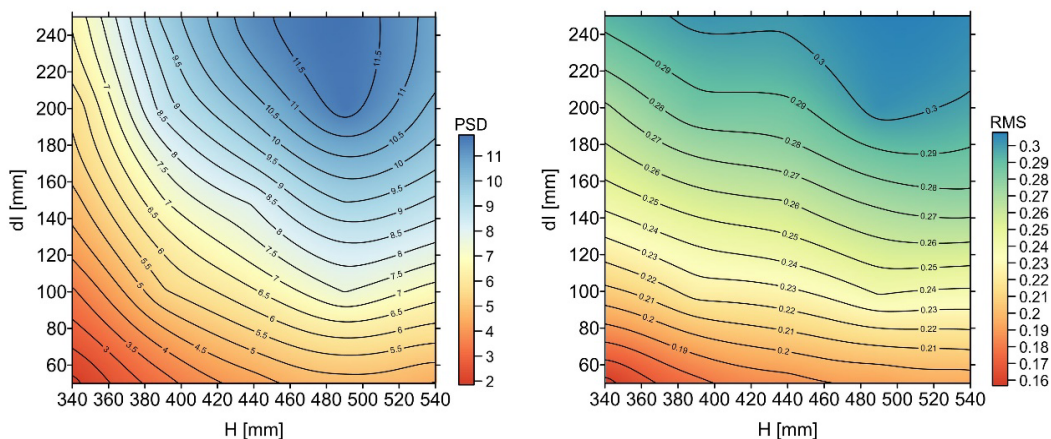
Badania parametrów elektrycznych elektrod ulotowych wykonano w następujących warunkach: temperatura $t = 21^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza $w = 52\%$, ciśnienie atmosferyczne $p = 991,9$ hPa.

Przykładowe wyniki pomiarów rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej dla zespołu dwóch elektrod ostrzowych dla zmiennych podziałek międzyrzędowych H przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej zespołu elektrod przy zmiennej podziałce H i podziałce międzyostrzowej $dl = 50$ mm, dla podziałki $H_z = 400$ mm

Na rysunku 6 przedstawiono zbiorcze wyniki zależności magnitudy gęstości widmowej mocy PSD oraz wartości średniokwadratowej RMS w funkcji podziałek międzyelektrodowej H i międzyostrzowej dl .



Rys. 6. Magnituda gęstości widmowej mocy PSD oraz wartości RMS gęstości prądu J w funkcji podziałek międzyrzędowej H i międzyostrzowej dl zespołu elektrod ostrzowych

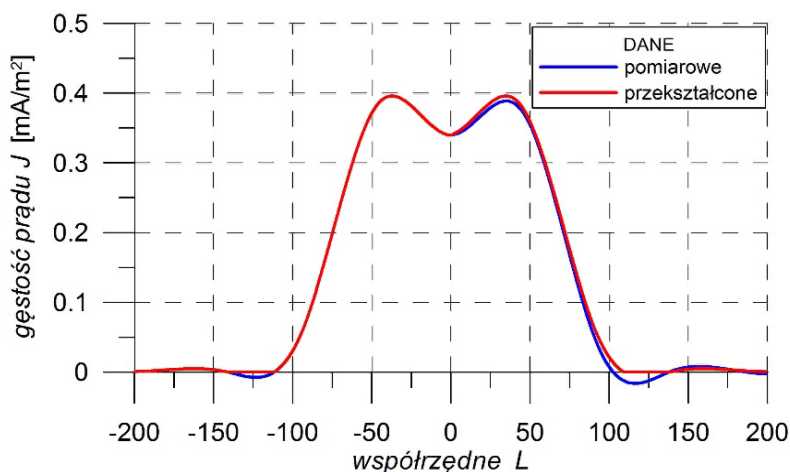
Wyniki badań wykazały, że zwiększenie odległości pomiędzy elementami emisyjnymi elektrody wpływa na wzrost gęstości prądu J . Maksymalna wartość tego prądu występuje przy podziałce międzyostrzowej $dl = 250$ mm. Jednocześnie wzrost odległości pomiędzy elektrodami ulotowymi powoduje spadek wartości gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej w osi symetrii zespołu elektrod ulotowych.

Analiza magnitudy gęstości widmowej mocy PSD oraz wartości RMS w funkcji podziałki międzyrzędowej H i międzyostrzowej dl wskazuje, że zarówno wzrost odległości pomiędzy elektrodami ulotowymi, jak i odległości pomiędzy elementami emisyjnymi elektrody skutkują wzrostem zarówno gęstości widmowej mocy, jak i RMS gęstości prądu wyznaczonych dla zespołu badanych elektrod. Obszary najwyższych wartości PSD oraz RMS

oznaczono barwą niebieską. Przedstawione powyżej wyniki pomiarów wskazują, że wraz ze wzrostem odległości pomiędzy elektrodami ulotowymi maksymalna wartość PSD rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej odpowiada podziałce $H=490$ mm.

3.2. Formuła matematyczna opisująca rozkład gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej elektrofiltru

Na podstawie wyników pomiarów opracowano model matematyczny rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej. Dane pomiarowe przedstawiające przebieg rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej J , w zależności od parametru H odpowiadającego podziałce międzyelektrodowej elektrod ulotowych oraz parametru dI będącego odległością pomiędzy wierzchołkami ostrz emisyjnych elektrod poddano wstępnemu przygotowaniu. Wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej w celu usunięcia wartości ekstremalnych oraz wygładzeniu analizowanych przebiegów rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej. Wartościom ujemnym gęstości prądu J , jako wielkościom niefizycznym, przypisano wartości zerowe. Następnie przekształcono analizowany przebieg rozkładu gęstości prądu J w zależności od współrzędnej geometrycznej L , tj. położenia wzdłuż elektrody zbiorczej, w ten sposób, aby był symetryczny względem osi rzędnych. W przypadku, gdy wykres nie wykazywał symetrii danych, prawą jego stronę zastępowano lustrzanym odbiciem strony lewej. Na rys.7 przedstawiono wynik przekształcenia danych zgodnie z przyjętą metodą analizy statystycznej.



Rys. 7. Rozkład gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej: dane uzyskane z pomiarów oraz po ich przetworzeniu

Przedstawiony na rys. 7 przebieg jest sumą dwóch pików o wyraźnej asymetrii. Taki przebieg może zostać opisany przez zsumowanie, co najmniej czterech pików symetrycznych o zmiennym stosunku Gauss/Lorentz [15]. Powoduje to jednak konieczność wprowadzenia do opisu każdego pików szeregu parametrów, takich jak: szerokości połówkowe, amplitudy, stosunek G/L i powiązanie ich z rozmieszczeniem przestrzennym elektrod. Ograniczenie liczby parametrów można osiągnąć używając do opisu przedstawionej zależności funkcji sigmoidalnej [19]. Z tego względu, do aproksymacji rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej zastosowano złożenie funkcji sigmoidalnych asymetrycznych, przez co uzyskano możliwość modelowania asymetrii przebiegu. Funkcja sigmoidalna ma postać równania zależności (1):

$$y=y_0+A[1/(1+\exp(-x+xc/w))] \quad (1)$$

gdzie:

- A – amplituda,
- w, xc –parametry funkcji,
- y_0 –wartość przesunięcia funkcji na osi y .

Zmiana parametru w powoduje zmianę nachylenia krzywej, natomiast parametr xc wyznacza punkt przegięcia krzywej i pozwala na przesunięcie krzywej wzdłuż osi x .

Złożenie dwóch funkcji sigmoidalnych pozwala uzyskać przebiegi asymetryczne, jeżeli wartości parametrów w_2 i w_3 będą miały różne wartości. Funkcja po złożeniu ma postać równania (2):

$$y=y_0+A[1/(1+\exp((-x+xc-w_1/2)/w_2))] \cdot [1-1/(1+\exp((-x+xc-w_1/2)/w_3))] \quad (2)$$

gdzie:

xc, w_1, w_2, w_3, xc – parametry funkcji

Parametr w_1 modyfikuje wartość parametru xc i pozwala na zmianę szerokości połówkowej piku.

Dla dwuelektrodowego zespołu elektrod ulotowych, rozkład gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej (rys. 7), można opisać poprzez złożenie funkcji sigmoidalnych asymetrycznych (3):

$$J=y_0+A_1[1/(1+\exp((-x+xc_1-w_{11}/2)/w_{21}))] \cdot [1-1/(1-\exp((-x+xc_1-w_{11}/2)/w_{31}))] + \\ + A_2[1/(1+\exp((-x+xc_2-w_{12}/2)/w_{22}))] \cdot [1-1/(1-\exp((-x+xc_2-w_{12}/2)/w_{32}))] \quad (3)$$

gdzie:

A_1, A_2 – amplitudy,

$w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}, w_{31}, w_{32}$, – parametry funkcji,

xc_1, xc_2 – parametry współrzędnej maksimum funkcji na osi x .

Parametr xc_1 definiuje położenie maksimum pierwszego piku na osi x (położenia na elektrodzie zbiorczej) i może zostać wybrany arbitralnie.

Elektrody ulotowe, stanowiące zespół, mają te same geometryczne cechy konstrukcyjne, tak więc oba piki składowe powinny być symetryczne względem osi przechodzącej przez środek krzywej (rys. 7), a ewentualne rozbieżności rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej, wynikają z różnic geometrii elektrod ulotowych (niedokładności ich wykonania). Na podstawie analizy danych doświadczalnych oraz z warunku symetryczności założono, że współczynniki: $A_1 = A_2 = A$, $y_0 = 0$, $w_{11} = w_{12} = w_1$, $w_{21} = w_{32}$ i $w_{31} = w_{22}$. Wymienione współczynniki są funkcjami następujących parametrów: odległości pomiędzy elektrodami ulotowymi (podziałka H) oraz odległości pomiędzy elementami emisyjnymi (podziałka dI).

Przyjęcie stałych wartości liczbowych dla współczynników w_1 , w_{21} i w_{22} , powoduje powstanie niewielkich niezgodności pomiędzy wartościami rzeczywistymi uzyskanymi z pomiarów, a wartościami wyliczonymi za pomocą modelu matematycznego. Wprowadzenie stałych wartości współczynników w_1 , w_{21} i w_{22} prowadzi do znacznego uproszczenia tego modelu, ograniczając liczbę zmiennych.

Analiza danych pomiarowych wykazała, że w przypadku podziałki międzyelektrodowej $H_Z = 400$ mm, wpływ odległości ostrzy dI i odległości pomiędzy elektrodami ulotowymi H na parametry: w_{21} i w_{22} jest niewielki. W celu ograniczenia liczby współczynników funkcji przyjęto następujące założenia upraszczające: $w_{21} = w_{32} = 1,5$ oraz $w_{31} = w_{22} = 2,6$.

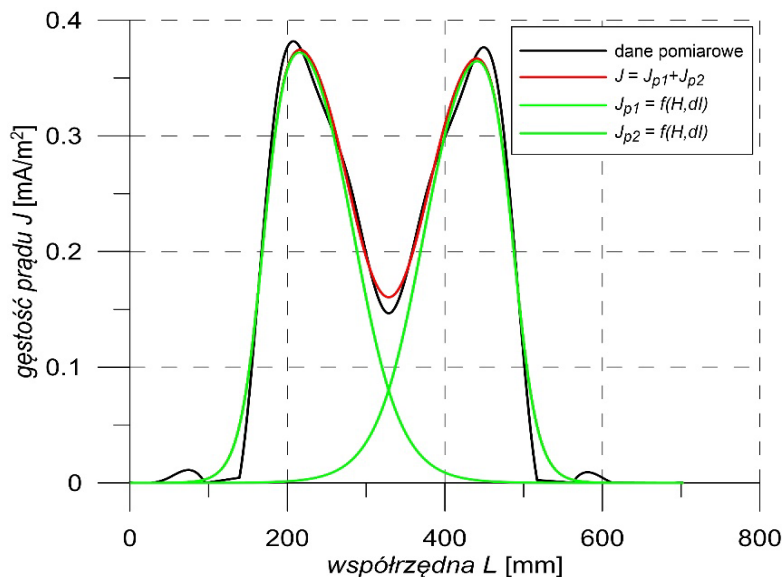
Po podstawieniu powyższych wartości postać funkcji (3) aproksymującej rozkład gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej dla elektrod ostrzowych przy podziałce międzyelektrodowej $H_Z = 400$ mm upraszcza się do postaci (4):

$$J(x,H,dI) = A[1/(1+\exp(-x+xc_1-(w_1/2)/1.5))] \cdot [1-1/(1+\exp(-x+xc_1-(w_1/2)/2.6))] + \\ + A [1/(1+\exp(-x+xc_2-(w_1/2)/2.6))] \cdot [1-1/(1+\exp(-x+xc_2-(w_1/2)/1.5))] \quad (4)$$

W rezultacie przyjętych założeń, do opisu rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej należy wyznaczyć trzy zmienne zależne od parametrów podziałki H i podziałki dI tj. współczynniki funkcji (4): A , xc_2 , oraz w_{11} .

Zgodnie z równaniem (3) zmiana parametru $xc1$ funkcji sigmoidalnej wpływa na położenie krzywej względem osi x . W przedstawionym przykładzie, wartość parametru $xc1$ ustalono arbitralnie, przyjmując współczynnik współrzędnej maksimum pierwszej funkcji składowej na osi $xc1 = 20$. Umożliwia to porównanie przebiegów rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej uzyskanych z pomiarów z wynikami wyznaczonymi za pomocą modelu matematycznego.

Na rysunku 8 pokazano przykład aproksymacji funkcją (4) danych pomiarowych rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej dla elektrod typu ostrzowego.



Rys. 8. Aproksymacja danych pomiarowych gęstości prądu J dla elektrod typu ostrzowego funkcją (4)

W tabeli 1 zestawiono współczynniki funkcji opisującej rozkład gęstości prądu J na elektrodzie zbiorczej.

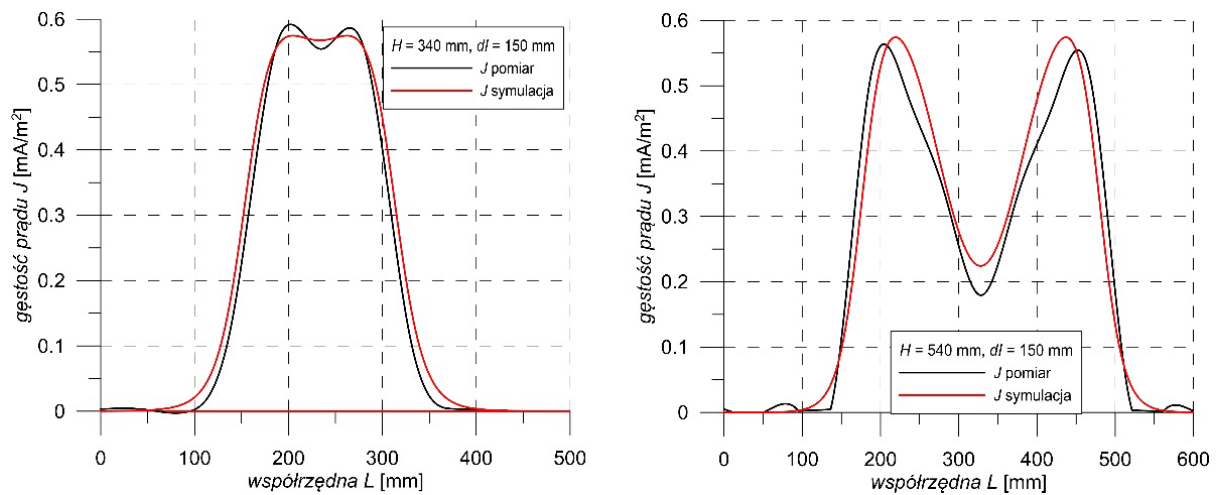
Tabela 1. Współczynniki funkcji $J = f(x, H, dI)$ dla elektrod ostrzowych

Współczynniki funkcji	Wartość/Funkcja
$w21$	1,5
$w31$	2,6
$xc2$	$xc1 - 10,634 + 0,0565 \cdot H + 0,0073 \cdot dI - 4,2857e-5 \cdot dI^2$
A	$-0,717 + 0,00485 \cdot H - 5,0655e-6 \cdot H^2 + 1,21e-3 \cdot dI$
$w1$	$14,0434 - 0,0415 \cdot H + 0,003 \cdot dI - 2,0e-5 \cdot dI^2$

Uwaga: Wartość $xc1$ przyjęto arbitralnie $xc1 = 20$

Model matematyczny opisujący rozkład gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej poddano weryfikacji poprzez porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacyjnymi uzyskanymi na drodze teoretycznej. Symulacji dokonywano przyjmując zmienne współczynniki funkcji (4) zamieszczone w tabeli 1. Symulowany przebieg rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej oraz przebieg zarejestrowany w wyniku pomiarów przeprowadzanych na stanowiskach laboratoryjnych poddawano analizie, mającej na celu wykazanie ich zbieżności. Umożliwiło to stwierdzenie, jaki wpływ mają przyjęte w modelu założenia upraszczające, na rzeczywisty obraz fizyczny zjawisk zachodzących w przestrzeni międzyelektrodowej elektrofiltrowego.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe porównanie przebiegów rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej wartości mierzonych oraz symulowanych.



Rys. 9. Porównanie danych pomiarowych rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej z przebiegiem wyznaczonym za pomocą modelu matematycznego

Kolorem czarnym zaznaczono krzywą obrazującą wyniki pomiarów, uzyskaną w drodze aproksymacji danych pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów algorytmem Levenbergera-Marquardta [18]. Krzywa zaznaczona kolorem czerwonym obrazuje przebieg wygenerowany na drodze symulacji z wykorzystaniem modelu opisanego równaniem (4), dla zespołu ostrzowych elektrod ulotowych, przy dwóch skrajnych podziałkach międzyrzędowych H .

Ocenę zgodności modelu z danymi pomiarowymi, przeprowadzono poprzez porównanie wartości średniokwadratowej RMS oraz wartości pola powierzchni I (5) odgraniczonej krzywą rozkładu gęstości prądu J i osią odciętych, danych uzyskanych w wyniku pomiarów rozkładu gęstości prądu J z wartościami uzyskanymi na drodze symulacji.

$$I_{H,dl} = \int_0^L J_{H,dl}(x) dx, \quad (5)$$

$$0 < L \leq 70.$$

Obliczenia wykonano wykorzystując procedury całkowania oraz wyznaczania wartości RMS zawarte w bibliotekach oprogramowania LabView National Instruments.

Porównanie rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej otrzymanych na drodze symulacji z wykorzystaniem modelu matematycznego z danymi pomiarowymi uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych wykazało, że różnice pomiędzy danymi pomiarowymi i pochodzącymi z symulacji dla większości analizowanych geometrii i konfiguracji wynoszą około 10% (tabela 2).

Tabela 2. Porównanie danych pomiarowych z wynikami symulacji

Wartość H, dl (mm)	Wartość $I_{H,dl}$ (dane pomiarowe)	Wartość $I_{H,dl}$ (symulacja)	Różnica (%)
$H=340, dl=150$	6,227	5,961	4,46
$H=340, dl=200$	6,650	6,494	2,40
$H=390, dl=150$	7,082	6,986	1,39
$H=390, dl=200$	7,817	7,541	3,66
$H=440, dl=150$	7,715	8,054	4,20
$H=440, dl=200$	8,470	8,665	2,25
$H=490, dl=150$	8,676	9,136	5,04
$H=490, dl=200$	9,710	9,839	1,31
$H=540, dl=150$	9,287	10,129	8,31
$H=540, dl=200$	9,993	10,960	8,82

Oceniając zgodność modelu matematycznego z wynikami pomiarów należy uwzględnić fakt, że pomiary parametrów elektrycznych elektrod były prowadzone na przemysłowych elektrodach ulotowych. Niektóre z tych elektrod miały błędy geometrii wynikające z technologii ich wytwarzania. Biorąc pod uwagę, że opracowany model matematyczny ma służyć do wspomagania procesu projektowania elektrofiltrów przemysłowych, gdzie występują błędy geometrii zespołów elektrod ulotowych (wykonawcze i/lub montażowe) przyjęto, że różnice pomiędzy wynikami pomiarów a uzyskanymi na drodze badań symulacyjnych są dopuszczalne.

4. Analiza wyników

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że najważniejszym parametrem geometrycznym decydującym o natężeniu pola elektrycznego wytwarzanego przez masztowe elektrody ulotowe jest ich geometria, określająca odległość pomiędzy umieszczonymi na jej maszcie nośnym elementami emisyjnymi (podziałka dI). Drugim istotnym parametrem jest odległość pomiędzy elektrodami (podziałka H).

Przebieg rozkładu gęstości prądu J na powierzchni elektrody zbiorczej w przypadku elektrod masztowych jest uwarunkowany wartościami podziałka międzyostrzowej dI oraz międzyrzędowej H . Zakres korzystnych wartości tych podziałek określono poprzez obliczenie zmian gęstości widmowej PS w funkcji podziałek H oraz dI . Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz badań symulacyjnych stwierdzono, że zakres korzystnych podziałek międzyrzędowej H oraz międzyostrzowej dI elektrod ulotowych typu ostrzowego wynoszą odpowiednio 440–540 mm oraz 200–250 mm. Wartości te są wyższe od obecnie stosowanych w elektrofiltrach przemysłowych.

Opracowany model rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej umożliwia szybkie wyznaczenie parametrów elektrycznych elektrody typu ostrzowego. Wyniki badań symulacyjnych oraz przeprowadzone pomiary parametrów stosowanych na skalę przemysłową elektrod ostrzowych wykazały, że ich geometria nie zapewnia możliwych do uzyskania gęstości prądu. Poprzez zmianę odległość pomiędzy elementami emisyjnymi obecnie stosowanych elektrod (o podziałce międzyostrzowej $dI = 200$ mm), można uzyskać wzrost magnitudy gęstości widmowej mocy PSD prądu na powierzchni elektrody zbiorczej od do 10%.

Badania elektrod o zmienionej geometrii przeprowadzono w elektrofiltrze laboratoryjnym dla pyłu lotnego ze spalania węgla kamiennego o stężeniach $3,4\text{g/m}^3$ oraz $7,2\text{g/m}^3$. Wykonane pomiary wykazały, że dla napięcia zasilania $U_Z = 65$ kV średnia wartość prądu ulotu wynosiła $I_E = 0,46$ mA. Porównanie skuteczności odpylania elektrofiltru wyposażonego w obecnie stosowane elektrody przemysłowe, z elektrodami o zmienionej geometrii nie wykazało znaczących różnic (w każdym przypadku skuteczność odpylania ok. 99%). Przyczyną tego jest zarówno niewielka długość i wysokość czynna elektrofiltru laboratoryjnego. Należy jednak uznać, że wzrost gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej świadczący o wzroście natężenia pola elektrycznego w komorze elektrofiltru będzie skutkować poprawą warunków separacji pyłu. Oznacza to, że dla analogicznych parametrów zasilania elektrofiltru nastąpi eliminacja zjawiska ponownego odrywania ziaren pyłu osadzonych na elektrodzie zbiorczej na skutek utraty ładunku elektrycznego lub zmniejszenie wpływu tego zjawiska na proces odpylania. Można również sądzić, że opisane powyżej zjawiska umożliwią skrócenie długości elektrofiltru przy zachowaniu wymaganej skuteczności odpylania.

Wprowadzenie proponowanych zmian geometrii elektrod ulotowych nie spowoduje wzrostu skuteczności odpylania pyłów o wymiarach poniżej $2,5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$). Skuteczna separacja w elektrofiltrze tych frakcji ziarnowych wymaga zastosowania specjalnych technologii (np. aglomeratorów) [8, 22].

Podsumowanie

Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych elektrod ulotowych oraz symulacji komputerowej rozkładu gęstości prądu na powierzchni elektrody zbiorczej elektrofiltru o płaskim układzie elektrod zbiorczych wskazały, że:

- zwiększenie podziałek (odległości pomiędzy elektrodami): międzyrzędowej H i międzyostrzowej dI elektrod ulotowych, w stosunku do obecnie stosowanych podziałek powoduje wzrost amplitudy gęstości prądu,
- w przypadku elektrod masztowych można uzyskać wartość natężenia pola elektrycznego, niezbędną do prawidłowego przebiegu procesu odpylania, zmniejszając liczbę elementów emisyjnych (ostrz) elektrody ulotowych,
- zwiększenie podziałek międzyrzędowych H umożliwi zmniejszenie liczby elektrod ulotowych zamontowanych w komorze elektrofiltru,
- zastosowanie wskazanej geometrii oraz konfiguracji elektrod ulotowych spowoduje obniżenie kosztów inwestycyjnych elektrofiltru oraz eksploatacyjnych w zakresie zużycia energii elektrycznej.

Podziękowania

Pracę sfinansowano z działalności statutowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, umowa nr 11.11.130.957.

Bibliografia

1. Adamiec-Wójcik I, Nowak A, Wojciech S. Application of the finite strip method to modeling of vibrations of collecting electrodes. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 2013; 13(7): 1–19.
2. Adamiec-Wójcik I, Nowak A, Wojciech S. Comparison of Methods for Modelling Vibrations of Collecting Electrodes in Dry Electrostatic Precipitators. *Archive of Mechanical Engineering* 2013; 60: 431–449.
3. Akishev Y, Goossens O, Callebaut T, Leys C, Napartovich A, Trushkin N. The influence of electrode geometry and gas flow on corona-to-glow and glow-to-spark threshold currents in air. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2001; 34: 2875–2882.
4. Atten A, Adamiak K, Khaddoura B, Coulomb J-L. Simulation of corona discharge in configurations with a sharp electrode. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2004; 6(3): 1023–1028.
5. Batmunkh S, Battogtokh Z, Modeling an electrostatic precipitator (ESP) with ESPVI 4.0W. *Second International Forum on Strategic Technology IFOST 2007*: 650–653.
6. Box G E P, Jenkins G M. *Time Series Analysis*. San Francisco: Holden Day, 1976.
7. Brocilo D, Podlinski J., Chang J S, Mizeraczyk J, Findlay R D. Electrode geometry effects on the collection efficiency of submicron and ultra-fine dust particles in spike-plate electrostatic precipitators. *Journal of Physics* 2008; 142: 1–6.
8. Chang Q, Zheng C, Gao X, Chiang P, Fang M, Luo Z, Cen K. Systematic Approach to Optimization of Submicron Particle Agglomeration Using Ionic-Wind-Assisted Pre-Charger. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 2709-2719.
9. Chung L, Chang C.-L, Bai H. Effects of Some Geometric Parameters on the Electrostatic Precipitator Efficiency at Different Operation Indexes. *Aerosol Science and Technology* 2000; 33(3): 228–238.
10. Dubois D, Merbahi N, Eichwald O, Yousfi M, Benhenni M. Electrical analysis of positive corona discharge in air and N_2 , O_2 , and CO_2 mixtures. *Journal of Applied Physics* 2007; 101: 053304-2-053304-9.
11. Fujishima H, Ueda Y, Tomimatsu K, Yamamoto T. Electrohydrodynamics of spiked electrode electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics* 2004; 62: 291–308.

12. Gooch J P, Francis N L. A Theoretically Based Mathematical Model for Calculation of Electrostatic Precipitator Performance. *Journal of Air Pollution Control Association* 1975; 25(2): 108–113.
13. Jędrusik M, Świerczok A. The correlation between corona current distribution and collection of fine particles in a laboratory-scale electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics* 2013; 71(3): 199–203.
14. Jędrusik M, Świerczok A, Teisseyre R. Experimental study of fly ash precipitation in a model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design. *Powder Technology* 2003; 135–136: 295–301.
15. Kojima I, Kurahashi M. Application of asymmetrical Gaussian/Lorentzian mixed function for X-ray photoelectron curve synthesis. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 1987; 42(2): 177–181.
16. Machnik R., Nocuń M. Effect of anti-corrosion coatings of corona electrodes on selected operating parameters of industrial electrostatic precipitators. *Eksploatacji Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 56–60.
17. Machnik R., Karwat B., Nocuń M., Niedźwiedzki J. Wpływ fizykochemicznych właściwości popiołów lotnych ze spalania węgla na proces elektrostatycznego odpylania spalin. *Przemysł Chemiczny* 2015; 94(9): 1530–1533.
18. Marquardt D, W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 1963; 11(2): 431–441.
19. Ohishi K, Okamura H, Dohi T. Gompertz software reliability model: estimation algorithm and empirical validation. *Journal of Systems and Software* 2009; 82(3): 535–543.
20. Parker K. *Electrical operation of electrostatic precipitators.*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.
21. Suleman M, Saleem M, Siebenhofer M. Characterization of brush type discharge electrodes and impact of enhanced corona discharge on operation of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics* 2012; 70: 144–148.
22. Truce R, Wilkins J, Crynack R, Harrison W. The Indigo agglomerator a proven technology for reducing visible emission from electrostatic precipitators. *Energetyka* 2005, 11 (617) 751–757.
23. Zhao L, Adamiak K. Numerical Simulation of the Effect of EHD Flow on Corona Discharge in Compressed Air. *IEEE Trans. on Industry Applications* 2013; 49(1): 298–304.
24. National Instruments, *LabView Advanced Signal Processing, Time Series Analysis Tools User Manual* 2005.