

doi:10.15199/48.2018.07.17

Pomiary i analiza zjawiska elektryzacji strumieniowej w układzie wahadłowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ do pomiaru elektryzacji strumieniowej oraz przykładowe wyniki pomiarów i analiz prądu elektryzacji. W tym układzie wykorzystano wahadłowy ruch elektrody poruszającej się w cylindrycznym zbiorniku do generacji i przemieszczania jonów, które powodują wytwarzanie prądu strumieniowego. Oscylacyjny charakter ruchu pozwala na wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych procesu elektryzacji. Przedstawiono przykładowe przebiegi sygnałów położenia, prędkości i prądu elektryzacji oraz wybrane charakterystyki widmowe.

Abstract. The article presents the system for measurement of streaming electrification current. Exemplary results of measurement and analysis are presented. In the device the inner cylinder moves oscillatory in the cylindrical tank. The movement leads to generation of charge and displacement of charges that produce the streaming electrification current. Oscillatory character of motion allows to determine the frequency characteristics of electrification process. Exemplary waveforms of position, velocity and electrification currents and selected spectral characteristics are presented (*Measurement and Analysis of streaming electrification phenomena in swinging cylinder system*)

Słowa kluczowe: elektryzacja strumieniowa, tendencja do elektryzacji, oleje transformatorowe, układ wahadłowy

Keywords: streaming electrification, electrostatic charging tendency, transformer oil, swinging cylinder system

Wstęp

Zjawisko elektryzacji strumieniowej a w szczególności wyładowania elektrostatyczne mogą powodować zagrożenie w środowiskach, w których występuje przepływ cieczy o niskiej konduktywności lub gazów czy proszków. Egan [1] opisuje 5 przypadków sytuacji krytycznych, które wystąpiły w fabrykach chemicznych, będących skutkiem zjawiska elektryzacji statycznej. W dwóch przypadkach spowodowały zapłon, w dwóch kolejnych porażenie obsługi. Liu i in. [2] wskazują na kilka zdarzeń w dużych transformatorach elektroenergetycznych, które powiązane zostały ze zjawiskiem elektryczności statycznej. Przemieszczanie się transformatorowego oleju mineralnego (o dużej tendencji do elektryzacji) względem ciała stałego powoduje gromadzenie się ładunków. Odpowiedzialnych za to jest szereg reakcji fizykochemicznych. Nagromadzenie ładunku skutkuje wytworzeniem wysokiego potencjału i ostatecznie może powodować wyładowania. Przekroczenie wartości krytycznej natężenia pola elektrycznego może skutkować wyładowaniem elektrycznym zupełnym a w konsekwencji uszkodzeniem izolacji lub zapłonem.

Elektryzacja statyczna może mieć również pozytywne zastosowanie. Przykładowo w pracach Cieśli [3] oraz Cieśli i in. [4] badano elektryzację ziaren węgla metodą tryboelektryczną.

Istnieje szereg parametrów wpływających na zjawisko elektryzacji strumieniowej. Bezpośrednie oddziaływanie ma prędkość wzajemnego przemieszczania się faz [5, 6]. Chen i in. [7] wykazali, że prąd elektryzacji rośnie liniowo ze wzrostem prędkości przepływu w warunkach laminarnych. Wzrost jest wykładniczy w warunkach przepływu turbulentnego. Wpływ prędkości badali również Jaroszewski i Kurnyta [8].

Do innych parametrów wpływających na wielkość tendencji do elektryzacji należą: rodzaj materiału fazy stałej, chropowatość powierzchni [5], temperatury [6]. Temperatura wpływa na prędkość dyfuzji oraz na prędkość migracji jonów w izolacji, czego skutkiem jest znaczący wpływ na prąd elektryzacji [7].

Duże znaczenie ma zewnętrzne pole elektryczne. Zarówno pole zmienne (AC) jak i stałe (DC) znacząco zwiększa zjawisko elektryzacji strumieniowej. Dodatkowo Liu i in. wykazali, że w pewnych warunkach prąd elektryzacji może zmieniać znak po przełożeniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego [6]. Du i in. [9, 10] analizowali wpływ amplitudy oraz częstotliwości, liczby i polaryzacji impulsów na zjawisko elektryzacji w izolacji

papierowo-olejowej. Podobne badania przeprowadzili Chen i in. [7], stwierdzili, że składowa zmienna zewnętrznego pola elektrycznego znacząco zwiększa prąd elektryzacji.

Zależność prądu elektryzacji od prędkości przepływu jest wykorzystywana do badań nad technikami przepływu masowego oraz rozkładu prędkości. Przykładowo Qian i in. wykorzystali zjawisko elektryzacji do pomiaru przepływu paliwa pyłowego w elektrowni węglowej w rurach o średnicy 510 mm [11]. Coombes i Yan [12] opracowali czujnik elektrostatyczny do badania przepływu masy oraz rozkładu koncentracji w rurach z przepływającą biomasa.

Jednym z obszarów zainteresowań związanych z badaniem elektryzacji strumieniowej olejów izolacyjnych jest znalezienie relacji między stopniem zesterzenia oleju a tendencją do elektryzacji. Huang i in. [13] zbadali zależność zesterzonej izolacji papierowo-olejowej (starzenie elektryczne i termiczne). Podobne badania można znaleźć w pracach Zhou i in. [14] oraz Wei i in. [15].

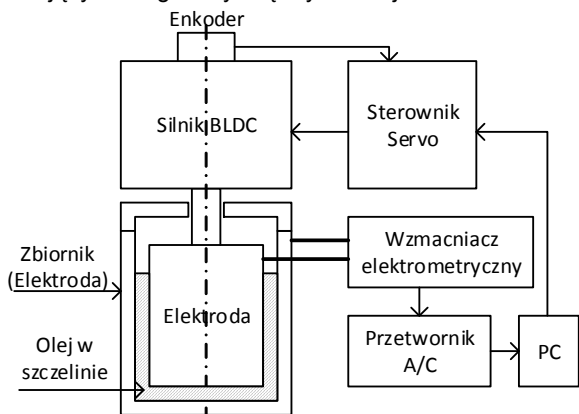
Wiele z prowadzonych badań dotyczy procesów przejściowych elektryzacji. Znaczące zmiany (głównie wzrost) występuje w większości prowadzonych badań. Przykładowo Talhi in. [5] w układzie wirującym (układ z obracającą się tarczą) zaobserwowali blisko 10-krotny wzrost prądu elektryzacji w początkowym okresie. Te gwałtowne zmiany wynikają z budowy warstwy podwójnej ładunku a w szczególności z charakterystyki pojemnościowej tej warstwy. Niestety klasyczny układ wirujący nie pozwala na dokładne zbadanie tego zjawiska. Dlatego za-projektowano nowy typu urządzenia, w którym elektroda wewnętrzna porusza się ruchem wahadłowym. W przypadku ruchu sinusoidalnego możliwe jest wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych a zatem możliwe jest zbadanie procesu elektryzacji w dziedzinie częstotliwości. Pro-wadzone badania były publikowane w pracach autorów [16].

Układ pomiarowy

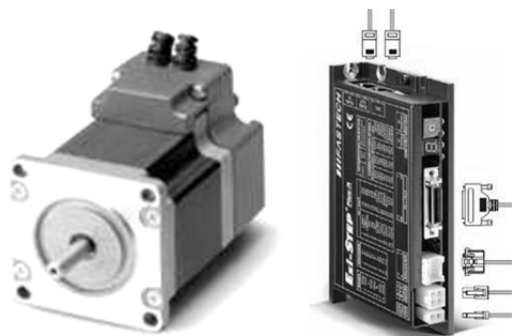
Podstawowym elementem układu pomiarowego jest elektroda metalowa umieszczona w cylindrycznym stalowym zbiorniku (Rys. 1). Elektroda jest sprzężona z silnikiem bezszczotkowym. Dzięki użyciu enkodera (10000 impulsów/obrót) oraz odpowiedniego układu sterowania (Ezi Servo Plus-R-86 Fastech) jest możliwe precyzyjne pozycjonowanie elektrody (Rys. 2). Odpowiednie oprogramowanie w środowisku Matlab sterujące serwomechanizmem pozwala na kontrolowanie przebiegu pozycji wahadła.

W szczelinie między elektrodami znajduje się mineralny olej transformatorowy o małym przewodnictwie oraz o dużej tendencji do elektryzacji.

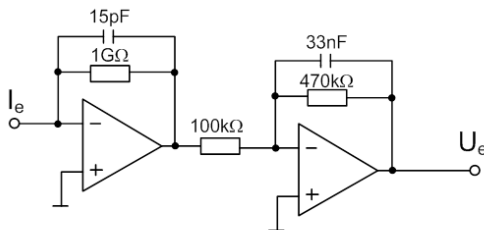
Równocześnie z pomiarem pozycji jest wykonywany pomiar prądu płynącego między elektrodą ruchomą a zbiornikiem. Prąd ten wynika z zjawisk fizykochemicznych powstających na granicy międzyfazowej ciecz-ciało stałe.



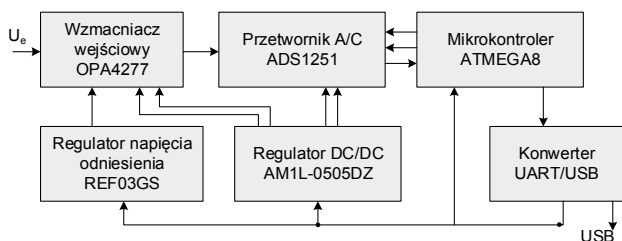
Rys. 1. Schemat blokowy układu z wahadłowym elektrometrem do pomiaru prądu elektryzacji strumieniowej



Rys. 2. Zdjęcia silnika i sterownika serwomechanizmu wykorzystanego do pozycjonowania elektrody



Rys. 3. Schemat ideowy wzmacniacza elektrometrycznego oraz filtrującego wzmacniacza aktywnego



Rys. 4. Schemat blokowy części cyfrowej elektrometru

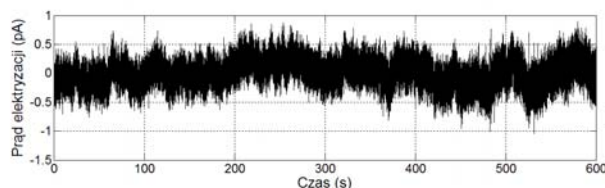
Do przetwarzania prądu elektryzacji na postać napięciową wykorzystano elektrometryczny wzmacniacz operacyjny z wejściem izolowanym dielektrycznie FET

(DIFET) OPA129 (Texas Instruments). Schemat ideowy układu wzmacniania prądu elektryzacji przedstawiono na rysunku 3. Prąd polaryzacji wejściowej wzmacniacza nie przekracza wartości 100 fA. Napięcie offsetu wynosi 2 mV, dryft temperaturowy 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Sygnal napięciowy reprezentujący mierzony prąd elektryzacji podawany jest na 24-bitowy przetwornik analogowy-cyfrowy ADS1251 (Texas Instruments) (Rys. 4). Efektywna rozdzielczość przetwornika (delta-sigma) wynosi 19 bitów (1,5 ppm) przy częstotliwości próbkowania 20 kHz.

W celu dostosowania bipolarnego sygnału wejściowego do unipolarnego wejścia przetwornika użyto wzmacniacza OPA4277. Dwa z czterech wzmacniaczy OPA4277 są wykorzystywane do buforowania napięcia odniesienia. Jeden zrealizowano w konfiguracji wzmacniacza sumującego. Do regulacji napięcia odniesienia wykorzystano precyzyjne źródło REF03 (Analog Devices) o napięciu wyjściowym 2,50 V. Współczynnik temperaturowy wynosi 50 ppm/ $^\circ\text{C}$. Dokładność regulacji wynosi maksymalnie 0,6%. Do zasilania układów wykorzystano regulator DC/DC AM1L-0505DZ. Do komunikacji z przetwornikiem A/C wykorzystano mikrokontroler ATmega8 (Microchip). Częstotliwość wysyłanych danych wynosi 500,0 Hz. Zakres mierzonych wartości wynosi od -4 do 4 nA. Maksymalna rozdzielczość wynosi ok 8 fA.

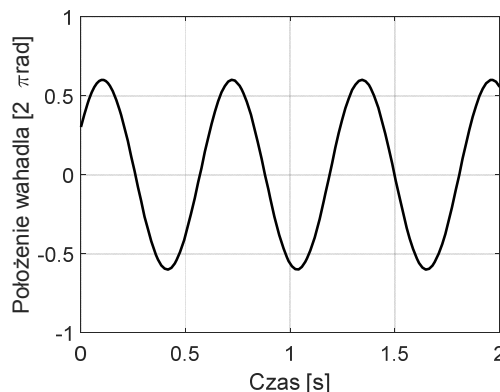
Na rysunku 5 pokazano przykładowy pomiar prądu elektryzacji przy nieruchomym wahadle. Pomiar trwał 10 min (300000 próbek). Przebieg pokazuje, że niepewność wynikającą z szumów w układzie elektronicznym można określić na poziomie ok. 0,5 pA.



Rys. 5. Przebieg czasowy szumu prądowego, przy braku generacji zjawiska elektryzacji; Częstotliwość próbkowania 500 Hz; Ilość próbek 300000

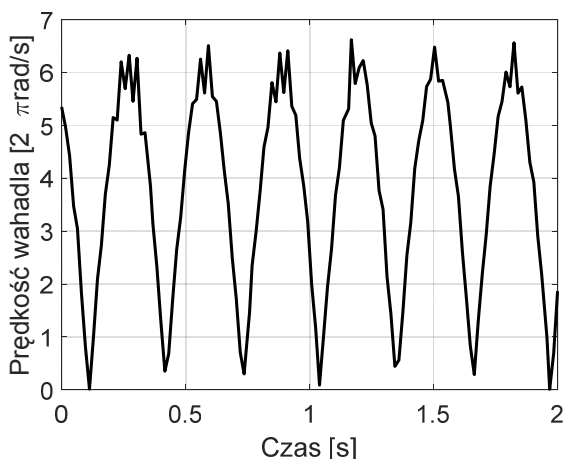
Pomiary elektryzacji strumieniowej w układzie wahadłowym

Wykonano szereg pomiarów prądu elektryzacji w odpowiedzi na różne wymuszenia. W niniejszej pracy pokazano przykładowe przebiegi prądu wyznaczone w odpowiedzi na wymuszenie sinusoidalne położenia wahadła.



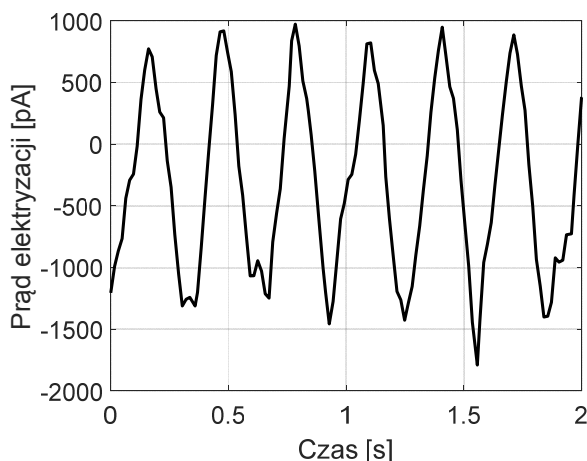
Rys. 6. Przebieg czasowy położenia wahadła.

W szczególności na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg położenia elektrody cylindrycznej. Amplituda wyniosła 0,6 wartości pełnego obrotu.

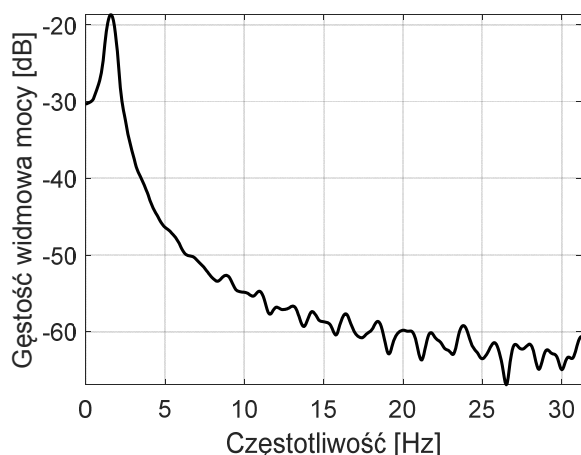


Rys. 7. Przebieg czasowy modułu prędkości chwilowej wahadła

Na rysunku 7 pokazano przebieg czasowy modułu prędkości wyznaczonej na podstawie położenia wahadła. Procedura wyznaczania prędkości polegała na różniczkowaniu sygnału położenia a następnie lokalnemu uśrednieniu oraz filtracji przy użyciu filtru Savitzkiego i Golaya (FIR).



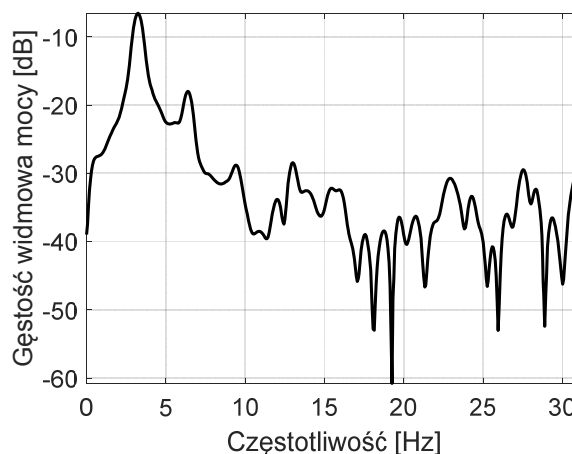
Rys. 8. Przebieg czasowy prądu elektryzacji strumieniowej w odpowiedzi na przebieg położenia przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 9. Gęstość widmowa mocy sygnału położenia wahadła.

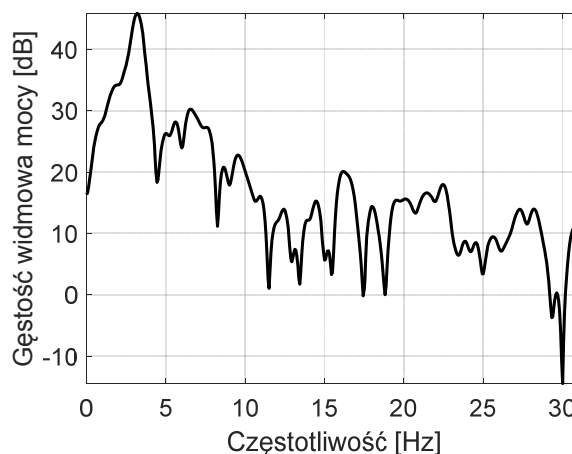
Na rysunku 8 pokazano zmierzony sygnał prądu elektryzacji wyznaczony w tym samym czasie co przebiegi położenia. Można zauważyć nieznaczne fluktuacje amplitudy. Częstotliwość sygnału jest w przybliżeniu zbieżna z częstotliwością modułu prędkości.

Dla zmierzonych przebiegów wyznaczono widma gęstości mocy. Na rysunku 9 zilustrowano widmo gęstości mocy położenia wahadła. Widmo to posiada tylko jedną widoczną składową o częstotliwości zgodnej z częstotliwością wahania elektrody. Sygnał jest pozbawiony składowych harmonicznych.



Rys. 10. Gęstość widmowa mocy składowej zmiennej sygnału modułu prędkości wahadła

Odpowiedni przebieg gęstości widmowej mocy składowej zmiennej modułu prędkości elektrody pokazano na rysunku 10. W tym przypadku w widmie można zauważyć kilka składowych o częstotliwości będącej wielokrotnością składowej podstawowej czyli częstotliwości pozycji wahadła poruszającego się ruchem sinusoidalnym.



Rys. 11. Gęstość widmowa mocy sygnału składowej zmiennej prądu elektryzacji strumieniowej

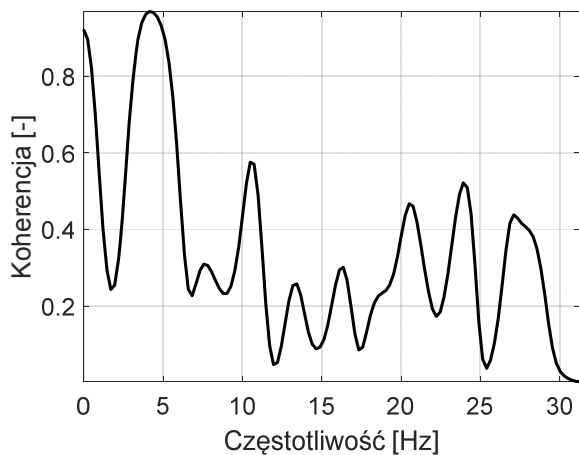
Na rysunku 11 pokazano przebieg widma gęstości mocy sygnału prądu elektryzacji. Interesujące jest to, że widmo to przypomina w kształcie widmo gęstości pozycji to znaczy, że istnieje korelacja w dziedzinie częstotliwości. Aby ilościowo ocenić tę korelację wyznaczono funkcję koherencji, którą wyraża zależność:

$$(1) \quad C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)}$$

gdzie: P_{xy} – wzajemna gęstość widmowa sygnałów x i y , P_{xx} – gęstość widma sygnału x , P_{yy} – gęstość widmowa sygnału y .

Funkcja koherencji przyjmuje wartości od 0 do 1. Wartości bliskie 1 oznaczają istnieje wysokiej korelacji dla danej częstotliwości.

Przebieg modułu koherencji dla sygnału składowej zmiennej prędkości oraz składowej zmiennej prądu elektryzacji pokazano na rysunku 12. Można zaobserwować, że rzeczywiście dla niektórych częstotliwości przyjmuje ona wartości bliskie 1. Najwyższa wartość występuje dla częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości podstawowej odpowiadającej oscylacjom elektrody.



Rys. 12. Przebieg funkcji kwadratu koherencji wyznaczonej na podstawie widma składowej zmiennej prędkości oraz widma prądu elektryzacji strumieniowej

Podsumowanie wyników analizy sygnału prądu elektryzacji mierzonego w układzie wahadłowym

Przedstawione badania oraz analizy sygnału prądu elektryzacji generowanego podczas ruchu wahadłowego źródła zjawiska pokazały, że proces elektryzacji strumieniowej jest skojarzony z przebiegiem modułu prędkości wahadła.

Widmo odpowiedzi sygnału prądu elektryzacji w dziedzinie częstotliwości zawiera znaczną ilość składowych. Zwłaszcza składowe parzyste mają duży udział w sygnale wyjściowym, chociaż składowe nieparzyste również należy brać pod uwagę.

Funkcja koherencji potwierdza zgodność składowej zmiennej prądu elektryzacji ze składową zmienną położenia wahadła szczególnie dla drugiej harmonicznej położenia wahadła.

Badania finansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki projekt OPUS nr 2013/11/B/ST8/03637.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Dariusz Zmarzły, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: d.zmarzly@po.opole.pl; dr hab. inż. Paweł Frącz, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: p.fracz@po.opole.pl.

LITERATURA

- [1] Egan S., Learning lessons from five electrostatic incidents, *J. Electrostat.*, 88 (2017), 1–7
- [2] Liu D., Du B., Yan M., Wang S., and Liu X., Investigation of electrification and breakdown strength about transformer oil/pressboard, *IET Electr. Power Appl.*, 11 (2017), n.3, 386–392
- [3] Cieśla A., Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2015), n.12, 67–70
- [4] Cieśla A., Skowron M., and Syrek P., Elektryzacja ziaren węgla metodą tryboelektryczną, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), n.1, 131–134
- [5] Talhi M., Fofana I., and Flazi S., Impact of various stresses on the streaming electrification of transformer oil, *J. Electrostat.*, 79 (2016), 25–32
- [6] Liu D., Du B., Liu F., and Wang S., Effects of multiple parameters on static electrification and breakdown strength of transformer oil, *IET Sci. Meas. Technol.*, 10 (2016), n.6, 597–601
- [7] Chen Q., Lin L., Gao Y., and Li J., Flow electrification characteristics of oil-pressboard insulation under ac superimposed on DC electric field, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22 (2015), n.5, 2915–2922
- [8] Jaroszewski M. and Kurnyta P., Pomiary prądów elektryzacji estrów naturalnych w układzie z wirującą tarczą, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2016), n.10, 90–93
- [9] Du B. X., Jiang J. P., Zhang J. G., and Liu D. S., Dynamic behavior of surface charge on double-layer oil-paper insulation under pulse voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23 (2016), n.5, 2712–2719
- [10] Du B. X. and Zhang J. G., Charge Coupling Behavior of Double-layer Oil – Paper Insulation under DC and Pulse Voltages, 23 (2016), n.4, 2059–2067
- [11] Qian X., Huang X., and Hu Y., Measurement of the Mass Flow Distribution of Pulverized Coal in Primary Air Pipes Using Electrostatic Sensing Techniques, (2016), 1–9
- [12] Coombes J. R. and Yan Y., Experimental investigations into the flow characteristics of pneumatically conveyed biomass particles using an electrostatic sensor array, *Fuel*, 151 (2015), 11–20
- [13] Huang M., Zhou Y., Dai C., Chen W., Lu L., and Sha Y., Charge transport in thermally and electrically stressed oil-impregnated paper insulation, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23 (2016), n.1, 266–274
- [14] Zhou Y. X., Jin F. B., Huang M., Huang J. W., Liu Z. H., and Lu L. C., Effects of DC prestressing on partial discharge in oil-impregnated pressboard insulation, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23 (2016), n.1, 460–468
- [15] Wei Y., Mu H., Deng J., and Zhang G., Effect of Space Charge on Breakdown Characteristics of Aged Oil-paper Insulation under DC Voltage, 23 (2016), n.5, 3143–3150
- [16] Zmarzły D. and Frącz P., Nonlinear modeling of streaming electrification measured in swinging cylinder system, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23 (2016), n.1, 174–182