

DOI: 10.5604/20830157.1201322

## ANALIZA ROZKŁADU POLA ELEKTRYCZNEGO W SEPARATORZE BĘBNOWYM O RÓŻNEJ KONFIGURACJI ELEKTROD

Urszula Śliwa, Mikołaj Skowron

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

**Streszczenie.** Statyczne pole elektryczne jest wykorzystywane w wielu procesach technologicznych m. in. w procesie separacji elektrostatycznej. Jednym z urządzeń wykorzystującym różne właściwości elektryczne separowanych cząstek jest separator bębnowy. W urządzeniu tym cząstki o różnej przewodności elektrycznej opadają na bęben. Cząstki dobrze przewodzące oddają swój ładunek i odrywają się od bębna natomiast cząstki słabo przewodzące zachowują swój ładunek i są przytrzymywane na powierzchni bębna. Do określenia skuteczności rozdzielania konieczne jest określenie trajektorii ruchu cząstek. Na trajektorie separowanych cząstek wpływa wiele czynników, wśród których najważniejsze to: układ systemu elektrod, wartość wysokiego napięcia (oba czynniki determinują rozkład pola elektrycznego między elektrodami). W artykule przedstawiono wyniki analizy rozkładu pola elektrycznego w separatorze bębnowym dla różnej konfiguracji elektrod i wartości przyłożonego napięcia.

**Słowa kluczowe:** pole elektrostatyczne, separacja elektryczna, separator bębnowy

### ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN THE DRUM SEPARATOR OF DIFFERENT ELECTRODE CONFIGURATION

**Abstract.** The static electric field is used in many industrial processes, such as electrostatic separation process. One of the devices that uses a difference in electrical properties of the particles is drum separator. In this device, particles of varying conductivity are electrified in the corona zone and fall on the drum. The particles of high conductivity lose their charges and brake off the drum while the particles of small conductivity keep their charges and are held on the drum surface. To determine the effectiveness of separation is necessary to determine the particle trajectories. Trajectories of separated particles are affected by many factors, among which the most important are: the electrodes configuration, value of high voltage (both factors determine the distribution of the electric field between the electrodes). The article presents the results of analysis of a distribution of the electric field in the drum separator for different configurations of electrodes and the applied voltage.

**Keywords:** electrostatic field, electrical separation, drum separator

### Wstęp

Technologie elektrostatyczne są szeroko stosowane do selektywnego sortowania materiałów ziarnistych. Separator elektrostatyczny bębnowy to urządzenie w którym następuje proces rozdzielania ziaren ze względu na ich różnice we właściwościach fizycznych za pomocą sił pola elektrycznego [1, 3, 4]. Większość przemysłowych separatorów działa na zasadzie różnic w ładunku przyjmowanym przez ziarna różnych minerałów.

Różnorodność urządzeń do elektroseparatoracji jest duża. Opis ich możemy znaleźć w wielu pracach naukowych opublikowanych w ciągu ostatniej dekady. W prezentowanym rozwiązaniu urządzenie posiada obrotowy walec metalowy i znajdujące się na przeciw niego dwie elektrody: koronowa i odchylająca, o symetrii cylindrycznej. Ziarna za pomocą taśmy podawane są na uziemiony, obracający się bęben. Następnie poddawane są działaniu silnie nieliniowego pola elektrycznego od elektrody grzebieniowej. Po intensywnym „bombardowaniu jonami” ziarna przechodzą przez pole elektryczne wytworzone przez elektrodę odchylającą i rozdzielają się w zależności od ich właściwości fizycznych. Cząstki o właściwościach dielektrycznych przylegają do powierzchni obrotowej gdzie ulegają rozładowaniu, natomiast te o właściwościach przewodzących, dzięki indukcji elektrostatycznej, przyciągane są w kierunku elektrody walcowej. Separator pracuje zwykle przy napięciach rzędu kilkunastu kilowoltów.

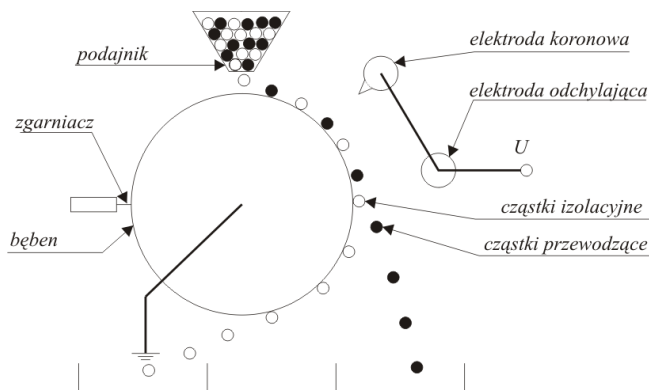
Separacja elektrostatyczna jest skutecznym sposobem recyklingu metali i niemetali np. z odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Jednym z takich odpadów są np. obwody drukowane (PCB), które zawierają wiele toksycznych materiałów lecz PCB zawierają prawie 28% metali nadających się do odzysku [2]. Efektywność tego rodzaju separatora zależy od wielu czynników takich jak: właściwości materiałów, wielkości granulki, prędkości wirowania bębna, poziomu wysokiego napięcia, konfiguracji elektrod czy warunków otoczenia.

Przy skutecznej separacji napotymano kilka problemów. Po pierwsze, półprodukt otrzymany w czasie procesu musi zostać poddany dalszemu rozdzielaniu. Po drugie, klasyczny separator nie jest zbyt wydajny. Większą zdolność produkcyjną można osiągnąć poprzez zwiększenie prędkości obrotów bębna, jednak prowadzi to ostatecznie do obniżenia efektywności separacji [2, 5].

Napotymane problemy prowadzą do badań nad odpowiednią konfiguracją elektrod, która zapewniłaby optymalną pracę separatora elektrostatycznego.

### 1. Model fizyczny

Separator to urządzenie, w którym następuje proces rozdzielania ziaren składników ze względu na ich różnice we właściwościach fizycznych. Konduktancyjne metody elektroseparatoracji polegają na wykorzystaniu odmiennych przebiegów czasowych ładunków elektrycznych na ziarnach, które różnią się między sobą wartością przewodności elektrycznej, a co za tym idzie stałą czasowej elektryzacji. Jednym z urządzeń wykorzystującym konduktancyjne metody elektroseparatoracji jest ulotowy separator bębnowy skonstruowany przez Huffa w 1905 r. Mieszanina ziaren wysypuje się z podajnika w strefę ulotu, gdzie elektryzuje się ujemnie, a następnie spada na powierzchnie bębna obrotowego. Ziarna składnika o małej oporności właściwej zmieniają znak ładunku z ujemnego na dodatni i są odrzucane siłami pola elektrycznego. Ziarna składnika o dużej oporności właściwej, dłużej zachowują ładunek uzyskany w strefie ulotu i przyciągane są do powierzchni bębna siłami pola elektrycznego oraz zwierciadlanego odbicia, przez co przenoszone są przez bęben do innej części odbieralnika, gdzie odpadają same lub są zagarniane przez szczotkę rys 1.



Rys. 1. Ideowy schemat działania separatora bębnowego

Na cząstki umieszczone w polu elektrycznym działa siła opisana równaniem:

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{p} \times \nabla \mathbf{E} + Q\mathbf{E} \quad (1)$$

gdzie:

$\mathbf{F}_e$  – siła oddziaływania pola elektrycznego,

$\mathbf{p}$  – moment elektryczny cząstek,

$\mathbf{E}$  – natężenie pola elektrycznego,

$Q$  – ładunek elektryczny cząstek.

Pierwszy wyraz równania opisuje siłę diaforezy, która występuje w polach niejednorodnych. Wykorzystanie jej do celów separacji jest trudna gdyż wymaga dużego gradientu pola elektrycznego co stwarza duże trudności techniczne. Drugi wyraz określa siłę elektroforezy, czyli siłę działania pola elektrycznego na naładowaną wcześniej cząstkę. Większość stosowanych w laboratoriach i przemyśle elektroseparatorów działa właśnie w oparciu o zjawisko elektroforezy. Warunkiem separacji jest wcześniejsze naelektryzowanie mieszaniny w sposób uzyskania zróżnicowanych wielkości ładunku przez ziarna rozdzielanych składników. Jest kilka możliwych metod elektryzacji ziaren, najczęściej w procesach elektroseparatora stosuje się: indukcję elektrostatyczną, ulot (wyładowania koronowe) oraz elektryzowanie przez tarcie i kontakt. Dwie pierwsze metody stosuje się w konduktancyjnych separatorach bębnowych, trzecią w separatorach tryboelektrycznych.

Na trajektorie separowanych cząstek wpływają następujące czynniki:

- układ systemu elektrod,
- wartość wysokiego napięcia,
- prędkość obrotowa bębna,
- wielkość separowanych cząstek,
- wilgotność względna otaczającego powietrza.

Kształt trajektorii cząstek w separatorze bębnowym związany jest z działaniem na cząstkę sił w czasie gdy jest ona przyklejona do bębna jak i po oderwaniu się od bębna w obszarze pola elektrycznego.

Ogólne równanie reprezentujące działające siły ma postać:

$$\Sigma \mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

$\Sigma \mathbf{F}$  – suma sił działających na cząstkę [N],

$m$  – masa cząstki [g].

W czasie w którym cząstka znajduje się na powierzchni bębna działają na nią siły:

- pola elektrycznego:

$$\mathbf{F}_e = Q\mathbf{E} \quad (3)$$

- odbicia zwierciadlanego:

$$\mathbf{F}_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(d^2)} \quad (4)$$

gdzie:

$Q$  – ładunek cząstki [C],

$E$  – natężenie pola elektrycznego [ $\text{Vm}^{-1}$ ],

$d$  – średnica bębna [m].

- odśrodkowa:

$$\mathbf{F}_o = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r \quad (5)$$

- grawitacji:

$$\mathbf{F}_g = mg \quad (6)$$

gdzie:

$r$  – promień bębna [m],

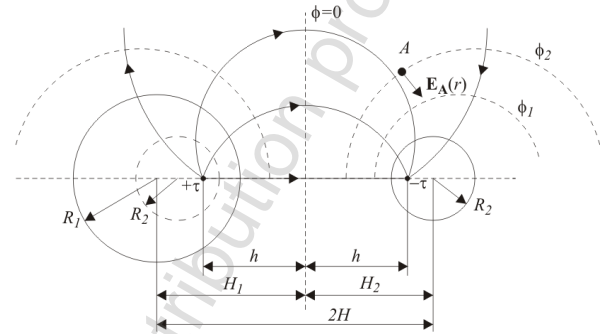
$\omega$  – prędkość kątowa bębna [ $\text{s}^{-1}$ ],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{ms}^{-2}$ ].

Na cząstki działają również siły: dynamicznego oporu osrodka, wzajemnego oddziaływania naelektryzowanych cząstek, siła zderzeń międzycząsteczkowych i inne, jednak mają one bardzo mały wpływ na ruch cząstek i ich pominięcie nie wpływa na dokładność analizy.

## 2. Analityczne rozwiązanie rozkładu pola elektrycznego

W przypadku gdy walce znajdują się w bliskiej odległości od siebie, konieczne jest uwzględnienie w obliczeniach ich promieni rys. 2. Powierzchnie walców pokrywają się z powierzchniami ekwipotencjalnymi fikcyjnych ładunków liniowych umieszczonych w płaszczyźnie przechodzącej przez osie symetrii. Można zatem uważać, że pole pochodzące od walców na zewnątrz ich zostało wytworzone przez dwa ładunki liniowe rozmieszczone symetrycznie względem osi  $y$  i oddalone od niej o  $h$  sytuacja przedstawiona została na rysunku 5.



Rys. 2. Obraz linii potencjału i pola elektrycznego w otoczeniu walców o różnych promieniach

Zastępczy układ ładunków musimy ukształtować tak, aby powierzchnie walców pokrywały się z dwiema wybranymi powierzchniami ekwipotencjalnymi tego układu. Znając promienie walców oraz odległości ich osi możemy sformułować układ równań:

$$H_1^2 - R_1^2 = h^2 \quad H_2^2 - R_2^2 = h^2 \quad H_1 + H_2 = 2H \quad (7)$$

z którego po rozwiązaniu można wyznaczyć parametry ustalające położenie osi symetrii zastępczego układu ładunków:

$$H_1 = H + \frac{R_1^2 - R_2^2}{4H} \quad (8)$$

$$H_2 = H + \frac{R_2^2 - R_1^2}{4H} \quad (9)$$

Aby określić wartości sił pola elektrycznego konieczna jest znajomość jego rozkładu w układzie elektrod separatora bębnowego. Założono, że walce są przewodzące, a napięcie między nimi jest równe  $U$ . Potencjał w punkcie A możemy obliczyć za pomocą następującej zależności:

$$V_A = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{(H_1+h)R_2}{(H_2+h)R_1} \quad (10)$$

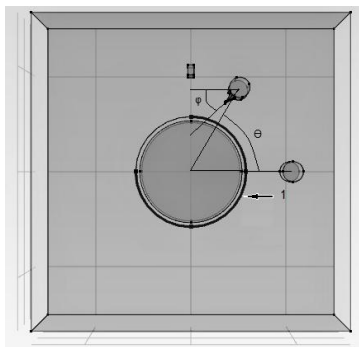
Wyrażenie określające natężenie pola elektrycznego jest dane przepisem:

$$\mathbf{E}_A(\mathbf{r}) = U \frac{h}{r(H+r\cos\psi)} \frac{1}{\ln \frac{(H_1+h)R_2}{(H_2+h)R_1}} \mathbf{a}_r \quad (11)$$

## 3. Model komputerowy

Rozkład potencjału oraz natężenie pola elektrycznego w układzie separatora bębnowego wykonane zostały przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych w środowisku COMSOL Multiphysics. Program ten jest pakietem symulacyjnym, rozwiązującym układy nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych w jednym, dwóch lub trzech wymiarach.

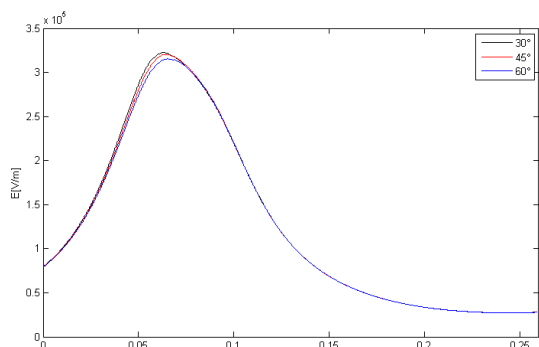
Model komputerowy składa się z obrotowego, uziemionego walca, nad którym umieszczono podajnik, dostarczający cząsteczki poddawane separacji. W skład modelu wchodzi również dwie elektrody: odchylająca, nieruchoma o kształcie walca oraz koronowa ruchoma, grzebieniowa mająca na celu zwiększenie pola elektrycznego w jej obrębie.



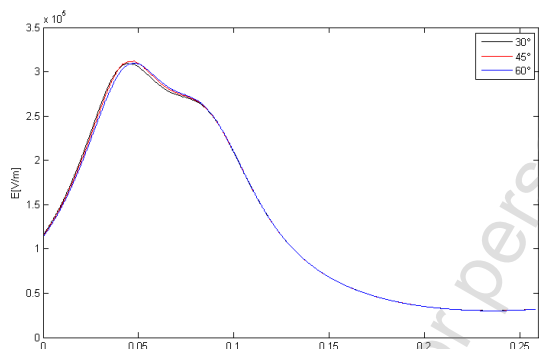
Rys. 3. Płaszczyzny ruchu elektrody grzebieniowej:  $\Theta$  i  $\phi$ . 1 – linia wzdłuż której obliczane jest natężenie pola elektrycznego, znajdująca się w odległości 5 mm od obrotowego bębna

### 3.1. Natężenie pola elektrycznego dla różnych położen elektrody grzebieniowej

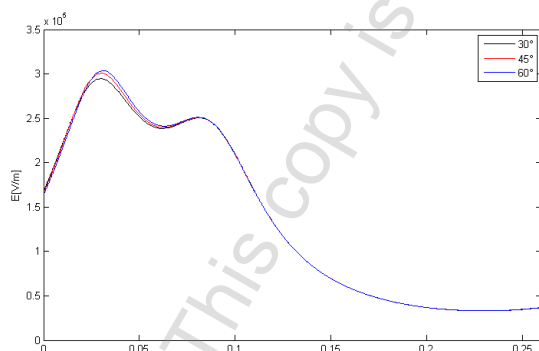
Do analizy przyjęto trzy wartości kąta  $\phi$ : ( $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ) oraz trzy wartości kąta  $\Theta$ : ( $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ), dla kombinacji tych wartości obliczono natężenie pola elektrycznego wzdłuż linii pokazanej na rys. 3. Do obliczeń zastosowano napięcie elektrod 11 kV.



Rys. 4. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\phi = (30^\circ; 45^\circ; 60^\circ)$ ,  $V = 11$  kV



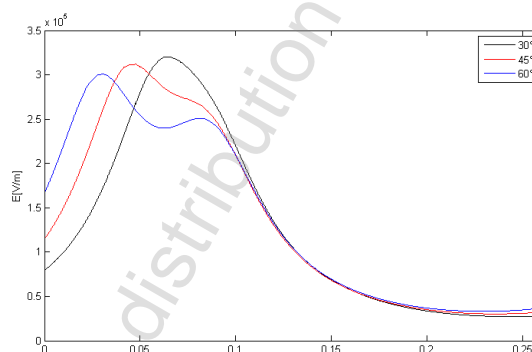
Rys. 5. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = 45^\circ$ ,  $\phi = (30^\circ; 45^\circ; 60^\circ)$ ,  $V = 11$  kV



Rys. 6. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\phi = (30^\circ; 45^\circ; 60^\circ)$ ,  $V = 11$  kV.

Dla kąta  $\Theta$  równego  $30^\circ$  największa wartość maksymalna występuje dla kąta  $\phi$  o wartości  $30^\circ$ , a najmniejsza dla kąta  $\phi$  o wartości  $60^\circ$  (rys. 4). Jednak różnica jest niewielka i wynosi około 3%. Dla kąta  $\Theta$  równego  $45^\circ$  i poszczególnych wartości kąta  $\phi$  różnice w natężeniu pola są bardzo małe i można ich nie brać pod uwagę (rys. 5). W ostatnim przypadku czyli dla kąta  $\Theta$  o wartości  $60^\circ$ , największa wartość maksymalna występuje dla kąta  $\phi$  o wartości  $60^\circ$ , a najmniejsza dla kąta  $\phi$  o wartości  $30^\circ$  (rys. 6). Różnica również jest niewielka i wynosi około 2%.

Z powyżej przedstawionych obliczeń wynika, że zmiana kąta  $\phi$  w zakresie  $30^\circ$ – $60^\circ$  w nieznaczny sposób wpływa na zmianę wartości natężenia pola elektrycznego w analizowanym obszarze. Do dalszych analiz wybrano wartość kąta  $\phi = 45^\circ$  dla tej wartości na rysunku 7 zestawiono charakterystyki natężenia pola elektrycznego dla różnych wartości kąta  $\Theta$  ( $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ).



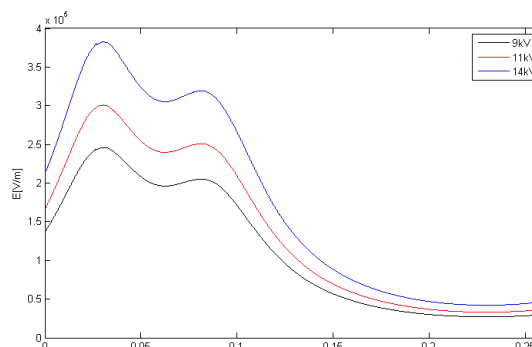
Rys. 7. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = (30^\circ; 45^\circ; 60^\circ)$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $V = 11$  kV

Zmiana położenia elektrody koronowej ma znaczący wpływ na rozkład pola elektrycznego. Najwyższe natężenie otrzymano dla  $\Theta = 30^\circ$ . Jednak w takim układzie cząstki materiału znajdują się w polu elektrycznym przez najkrótszy okres czasu. Najdłuższe oddziaływanie pola na cząsteczkę otrzymano dla  $\Theta = 60^\circ$  i jest ono o około 30% większe od czasu dla kąta  $\Theta = 30^\circ$ , przy jednoczesnej niższej maksymalnej wartości natężenia.

### 3.2. Rozkład natężenia dla różnych wartości napięć zasilania

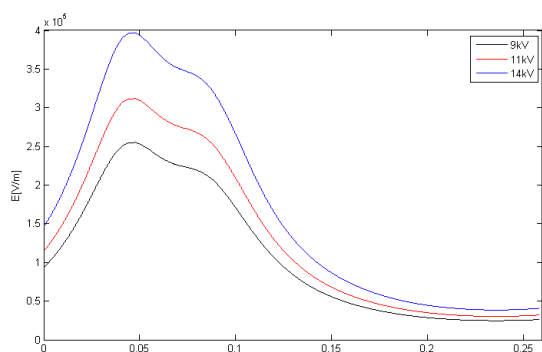
Z poprzednich analiz wynika, że najkorzystniejszym będzie wybranie układu elektrod dla kątów  $\phi = 45^\circ$  oraz  $\Theta = 45^\circ$  i  $60^\circ$ . Rozkład natężenia można również zmieniać za pomocą napięcia zasilającego elektrody. Do obliczeń wybrano napięcia odpowiednio 9, 11, 14 kV.

Rys. 7 i rys. 8 przedstawiają natężenie pola elektrycznego przy różnej wartości napięcia na elektrodach. Zauważono, że zastosowanie wyższego napięcia powoduje wzrost maksymalnego natężenia pola wywołanego przez elektrodę grzebieniową w stosunku do elektrody statycznej. Nadmierne podwyższanie napięcia może doprowadzić do wyładowania, które przerywa proces separacji.



Rys. 8. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $V = (9, 11, 14)$  kV

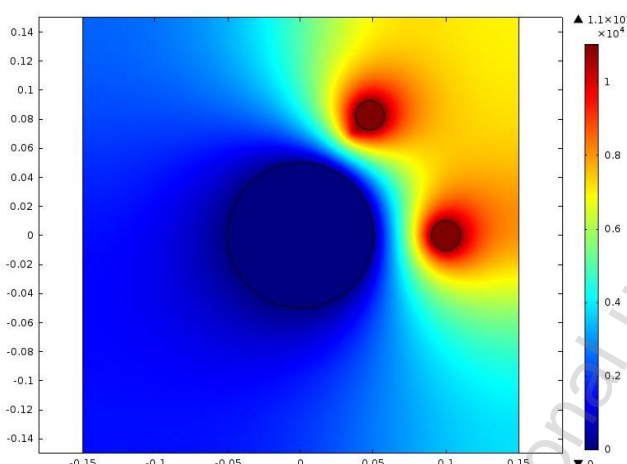




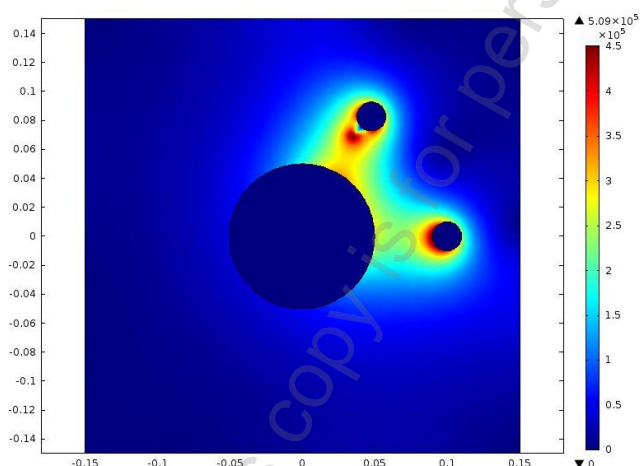
Rys. 9. Natężenie pola elektrycznego dla  $\Theta = 45^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $V = (9, 11, 14)$  kV

### 3.3. Rozkład natężenia pola i potencjału elektrycznego

Rysunek 10 przedstawia rozkład potencjału elektrycznego dla kątów elektrody koronowej  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  oraz napięcia  $V = 11$  kV. Na rysunku 11 przedstawiono rozkład natężenia pola elektrycznego dla konfiguracji elektrody koronowej opisanej wyżej. Największe natężenie pola jest w obszarze zakończenia ostrza elektrody koronowej. Duże natężenie pola występuje również przy powierzchni bębna w obszarze między elektrodami, oznacza to że cząstki znajdujące się na bębnie, w tym obszarze, są w pod działaniu pola i działają na nie siły związane z polem.



Rys. 10. Rozkład potencjału elektrycznego dla  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $V = 11$  kV



Rys. 11. Rozkład natężenia pola elektrycznego dla  $\Theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $V = 11$  kV

## 4. Podsumowanie

Za pomocą separatora bębnowego można rozdzielać cząstki o właściwościach przewodzących od cząstek o właściwościach nie przewodzących. Naładowane cząstki o właściwościach przewodzących spadając na uziomiony bęben szybko tracą ładunek i są przyciągane przez elektrodę odchylającą. Cząstki nie przewodzące spadając na bęben dłużej zachowują ładunek i są przyciągane przez bęben dłużej. Trajektorie separowanych cząstek zależą nie tylko od ich właściwości elektrycznych ale także od prędkości obrotowej bębna, wilgotności powietrza, klasy uziarnienia ale przede wszystkim od wartości natężenia pola elektrycznego i czasu jego działania na cząstkę.

Analiza wyników obliczeń skłania do następujących wniosków i spostrzeżeń:

- rozkład natężenia pola można zmieniać poprzez odpowiednie ułożenie elektrody koronowej (zmianę kątów  $\varphi$  oraz  $\Theta$ , rys. 3),
- zmiana kąta  $\varphi$  w niewielkim stopniu wpływa na rozkład natężenia pola elektrycznego.
- zmiana kąta  $\Theta$  ma znacznie większy wpływ na rozkład natężenia pola, na jego wartość maksymalną, a także na wielkość obszaru działania.
- największy wpływ na natężenie ma wartość napięcia podane-go na elektrodę, nie można jednak zastosować zbyt dużego napięcia, ponieważ może to spowodować wyładowanie zupełne między elektrodą koronową a bębniem, co bardzo nie korzystnie wpływa na proces separacji.

## Literatura

- [1] Cieśla A.: Dynamiczne działanie pól: elektrycznego i magnetycznego w elektrotechnologiach (na przykładzie separacji). Prace Instytutu Elektrotechniki 2007, 81–93.
- [2] Jiang W., Li J., Xu Z.: A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board, Journal of Hazardous Materials 161, 2009, 257–262.
- [3] Li J., Xu Z., Zhou Y.: Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. Journal of Electrostatics 65, 2007, 233–238.
- [4] Li J., Lu H., Liu S., Xu Z.: Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field. Journal of Hazardous Materials 153, 2008, 269–275.
- [5] Veit H.M., Diehl T.R., Salami A.P., Rodrigues J.S., Bernardes A.M., Tenorio J.A.S.: Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. Waste Management 25, 2005, 67–74.

Dr inż. Mikołaj Skowron  
e-mail: mskowron@agh.edu.pl



Ukończył studia magisterskie w 2004 r. w Akademii Górniczo-Hutniczej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki na kierunku Elektrotechnika o specjalności Elektroenergetyka. W 2011 r. obronił pracę doktorską na tym samym Wydziale. Od września 2011 r. jest adiunktem w Katedrze Elektrotechniki i Elektroenergetyki. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami pola elektromagnetycznego w procesach technologicznych, wpływu pola na organizmy żywe oraz zastosowaniem nadprzewodników.

Urszula Śliwa  
e-mail: ulasliw@gmail.com



Studentka Elektrotechniki na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo – Hutniczej. Członkini koła naukowego elektroenergetyków „Piorun”. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami związanymi z polem elektromagnetycznym.