

## Wybrane aspekty pracy elektrycznych i magnetycznych separatorów odchylających

**Streszczenie.** Statyczne pola: elektryczne i magnetyczne znajdują zastosowania (miedzy innymi) w procesach technologicznych. Jednym z nich jest separacja i filtracja. Separacja elektryczna jest procesem, w którym dwie lub więcej faz stałych różniących się właściwościami elektrycznymi, są rozdzielane siłami pola elektrycznego. Separacja magnetyczna jest procesem, w którym dwie lub więcej faz różniących się właściwościami magnetycznymi są rozdzielane siłami pola magnetycznego. Separatorzy odchylające charakteryzują się ciągłością pracy, a naelektryzowane ziarna lub ziarna o określonych właściwościach magnetycznych odchylane są odpowiednio siłami pola elektrycznego lub magnetycznego.

**Abstract.** Static electric and magnetic fields – among the others – are used in technological processes. In the electrotechnology field important role has electric and magnetic separation and filtration. Electric separation is a process where two or more solid phases, with different value of electric charge are separated with the force of the electric field. Magnetic separation is a process of separation two or more solid phases which differ with the magnetic properties. The deflecting separators are the devices that are characterizing with the continuous work, where the charged particle or the magnetic particles (magnetic fraction of slurry) are deflected by the electric or magnetic field force. **Selected aspects of work of the electric and magnetic deflecting separators**

**Słowa kluczowe:** separacja, pole elektryczne, pole magnetyczne, separatorzy odchylające.

**Keywords:** separation, electric field, magnetic field, deflecting separators

### Wstęp

Procesów separacji elektrycznej i magnetycznej nie można zastosować jako głównej operacji wzbogacania, nie można jednak przecenić ich roli w realizacji bardziej finezyjnych zadań przeróbki różnych surowców. Można tu wymienić usuwanie niewielkich - często na granicy śladowych - zawartości niepożądanych składników. Bardzo duże pole zastosowań tych operacji wiąże się z użyciem różnych, nie tylko mineralnych, materiałów odpadowych. Podstawą takiego rodzaju zastosowań jest fakt znacznego zróżnicowania właściwości elektrycznych i magnetycznych składników materiałów, a warunkami dalsze rozwijanie omawianych operacji w kierunku zwiększenia natężenia pól elektrycznych i magnetycznych działających w strefach rozdziału odnośnych urządzeń - z jego lokalnym zróżnicowaniem, np. w separatorach poligradienowych - powiększanie efektywności energetycznej urządzeń (np. separatorzy z uzwojeniem nadprzewodzącym). Wszystkie te zadania są już realizowane i stopniowo wdrażane w praktyce przemysłowej [1].

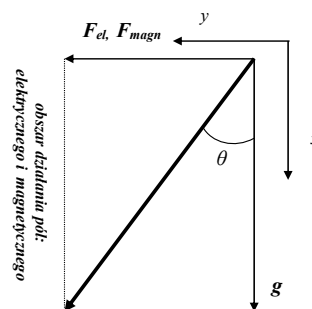
Spśród wielu rozwiązań separatorów, autor przedmiotem rozważań niniejszego artykułu uczynił odchylające (ang. *deflecting*) separatorzy wykorzystujące siły pola elektrycznego i magnetycznego do rozdziału zróżnicowanych pod względem stosownych właściwości frakcji. Wskazana zostanie specyfika separatorów odchylających, w których obserwuje się dynamiczne działania pól zarówno elektrycznego i magnetycznego.

### Separatorzy odchylające

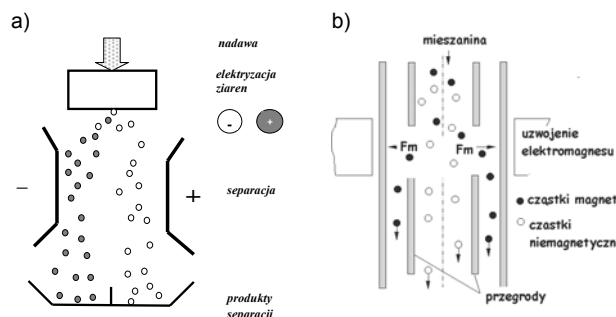
Separatorzy odchylające są jedną z odmian konstrukcyjnych separatorów, w których ziarna znajdujące się w strefie rozdziału zmieniają trajektorie ruchu pod wpływem siły pola elektrycznego lub magnetycznego tworząc produkty separacji: odpowiednio koncentrat lub odpady. Działanie obu wymienionych sił na ziarna objawia się przez ich odchylenie od pionowo przepływającej strugi. O wielkości odchylenia decydują siły operujące w strefie rozdziału ziaren. Na rysunku 1 przedstawiono ideę odchylenia ziaren. Zaznaczono na nim siły odchylające ziarna (odpowiednio:  $F_{el}$  i  $F_{magn}$ ) od pionowo przepływającej strugi ziaren pod wpływem siły grawitacji ( $g$ ).

Proces separacji elektrycznej odbywa się w dwóch etapach: etap pierwszy to selektywna elektryzacja ziaren, etap drugi to ruch strugi w polu elektrycznym separatora, w

wyniku czego następuje rozdział uprzednio naelektryzowanych ziaren, których ładunki różnią się znakiem lub wartością (rysunek 2a). W magnetycznym separatorze odchylającym trajektorie ziaren o określonych właściwościach magnetycznych (podatności magnetycznej) zmieniają się pod wpływem niejednorodnego pola magnetycznego (rysunek 2b).



Rys. 1. Odchylenie ziaren w elektrycznym i magnetycznym separatorze deflekcyjnym



Rys. 2. Idea działania separatorów odchylających: a) elektrycznego, b) magnetycznego

Równanie sił działających na cząstkę znajdującą się w strefach rozdziału separatorów odchylających zapisuje się w postaci [2]:

$$(1) \quad m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}$$

gdzie :  $\sum \vec{F}$  – suma wszystkich sił, które działają na ziarno,  $m$  [g] - masa ziarna.

Poniżej autor zestawiał podstawowe zależności określające główne siły działające w procesie separacji:

- (2)  $\vec{F}_{el} = Q \cdot \vec{E}$  - siła elektroforezy
- (3)  $\vec{F}_{magn} = \chi V grad \left( \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} \right)$  - siła pola magnetycznego
- (4)  $\vec{F}_{gr} = m \cdot \vec{g}$  - siła grawitacji
- (5)  $\vec{F}_{dyn} = 6\pi\eta\vec{v}$  - siła dynamicznego oporu ośrodka

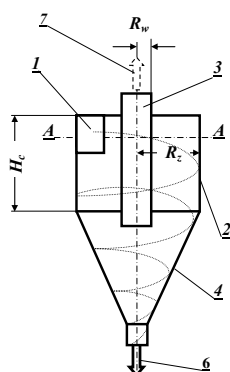
Analiza zależności (2) i (3) pokazuje specyfikę działania obu typów separatorów: skuteczność separacji elektrycznej zależy głównie od wartości ładunku  $Q$ , który ziarno może uzyskać w procesie elektryzacji i wartości natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$ , zaś o skuteczności separacji magnetycznej decyduje (oprócz właściwości magnetycznych ziaren: ich podatności magnetycznej  $\chi$ ) niejednorodność pola magnetycznego.

### Odchylające separatory elektrostatyczne

#### Elektryzowanie ziaren i rezultaty badań

Jak zaznaczono wyżej, specyfiką działa elektrostatycznych separatorów odchylających jest obecność ładunku elektrycznego na ziarnach rozdzielanej mieszaniny. Optymalny przypadek to ziarna mieszaniny naelektryzowane ładunkiem o przeciwnych znakach i do możliwie największej wartości.

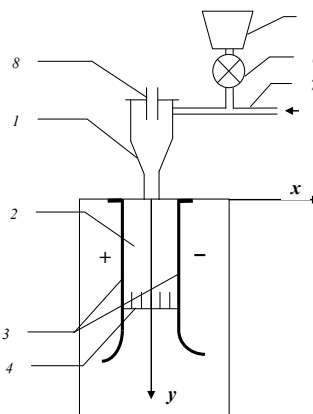
Spośród wielu znanych metod elektryzowania ziaren (w polu ulotu, przez indukcję), autor rozważa elektryzowanie przez tarcie (efekt tryboelektryczny). Ziarna rozdzielanej mieszaniny trąc o odpowiednio dobrane podłoże, elektryzują się. Wartość i znak ładunku zależy od wielu czynników, z których istotne są m.in. różnice w wartościach prac wyjść, siła docisku podczas tarcia. Autor w prowadzonych przez siebie eksperymentach wykorzystał do elektryzowania cyklon (rysunek 3). Zastosowanie cyklonu w procesie tryboelektryzacji pozwala na intensyfikację kontaktu ziaren z powierzchnią elektryzatora (np. z metalem, z którego zbudowany jest cyklon) a tym samym uzyskiwanie ładunków o znacznej wartości [3].



Rys. 3. Zasada działania cyklonu:  
1 – króciec wlotowy, 2 – część cylindryczna (płaszcz cyklonu), 3 – rura wylotowa (komin cyklonu), 4 – część stożkowa, 5 – mieszanina gazu transportującego i ziaren, 6 – ziarna naelektryzowane, 7 – gaz transportujący

Naelektryzowane w cyklonie różnoimiennie lub ze znaczną różnicą wartości ładunków ziarna w komorze separatora zostają odchylane siłą elektroforezy stosownie do znaku i wartości nabytego ładunku bądź to do

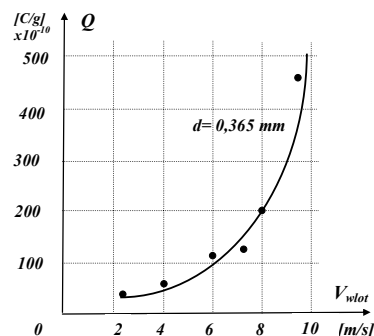
elektrody dodatniej, bądź ujemnej. Rysunek 4 pokazuje stanowisko do badań ruchu strugi ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego.



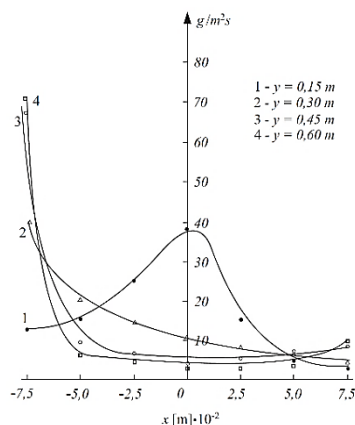
Rys. 4. Stanowisko do badań ruchu strugi ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego:  
1 – elektryzator (cyklon), 2 – komora separatora (obszar pola elektrycznego), 3 – elektrody płasko – równoległe, 4 – odbieralnik, 5 – zbiornik ziaren, 6 – podajnik, 7 – przewód transportujący, 8 – wylot powietrza z cyklonu

Na rysunku 5a pokazano rezultaty elektryzowania ziaren węgla w zależności od prędkości wlotowej do cyklonu [3], zaś rysunek 5b obrazuje rozkład masy ziaren w przegrodach odbieralnika separatora. Parametrem jest odległość odbieralnika  $y$  od wylotu cyklonu [4].

a)



b)



Rys. 5. Zależność ładunku jednostkowego ziarna węgla  $Q$  od prędkości wlotowej do cyklonu  $v_{wlot}$  (a) [3], rozkład masy ziaren  $\gamma$  w odbieralniku dla  $E = 3$  kV/cm; uziarnienia  $d = 0,1- 0,2$  mm, prędkości wlotowej do cyklonu  $v_{wlot} = 3,0$  m/s (b) [4]

## Odchylające separatory magnetyczne

### Idea działania i rezultaty obliczeń

Ideę działania magnetycznych separatorów odchylających pokazano na rysunku 2b. Zaznaczono na nim cząstki para- i diamagnetyczne, które w niejednorodnym polu magnetycznym będą odchylane w kierunku większej, lub mniejszej niejednorodności pola magnetycznego.

Analiza zależności (3) zapisanej dla ziarna w kształcie kuli w postaci:

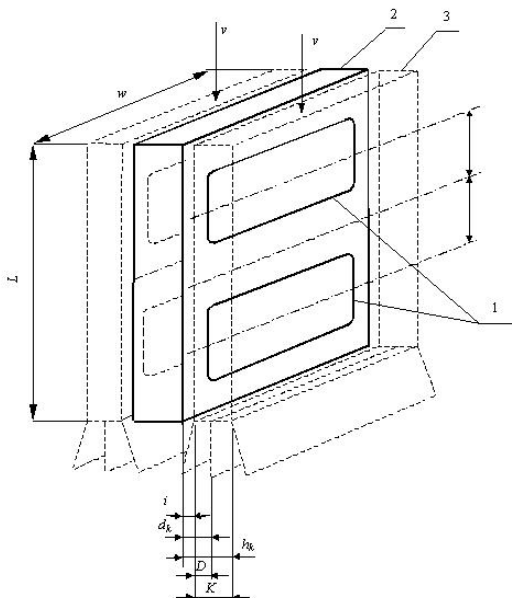
$$(6) \quad F_{m\xi} = V_p \cdot \mu_0 \cdot M^* \cdot \nabla_{\xi} H$$

gdzie:  $M^* = H_0 \frac{9(\chi_p - \chi_f)}{(3 + \chi_p)(3 + \chi_f)}$  - względna magnetyzacja między ziarnami a fluidem, w którym te ziarna się znajdują, [ $A \cdot m^{-1}$ ];  $H_0$  - natężenie pola magnetycznego, [ $A \cdot m^{-1}$ ];  $\chi$  - objętościowa podatność magnetyczna odpowiednio: ziarna i fluidu, [-],  $V_p$  - objętość ziarna, wskazuje, że dla skutecznego działania magnetostaticznego separatora odchylającego niezbędnym jest spełnienie warunku:

$$(7) \quad \nabla_{\xi} H \neq 0,$$

co oznacza, że pole magnetyczne w przestrzeni rozdzielania ziaren ( $\xi$ ) musi być silnie niejednorodne (zarówno  $V_p$  jak i  $M^*$  w zależności (6) mają wartości dodatnie).

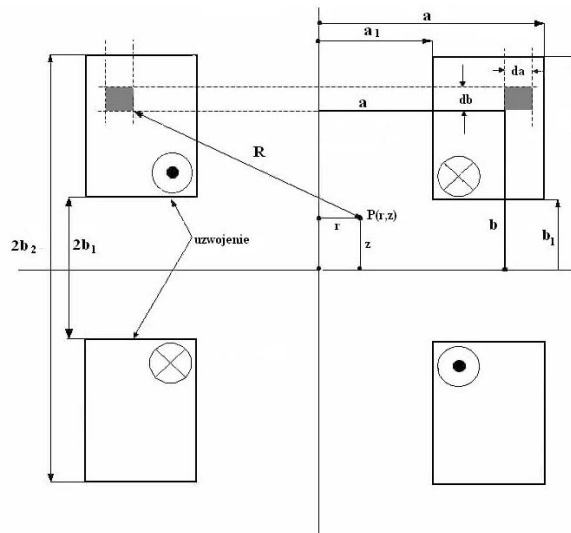
Do rozdzielania mieszaniny składników o zróżnicowanych właściwościach magnetycznych (podatność magnetyczna  $\chi$ ) siłami pola magnetycznego, dobiera się różnego rodzaju konstrukcje separatorów w zależności głównie od właściwości magnetycznych separowanego medium. Przedmiotem rozważań dalszej części artykułu jest wysokogradientowy separator odchylający (OGMS - Open Gradient Magnetic Separator). Schemat jednego z możliwych rozwiązań konstrukcyjnych tego typu separatora przedstawia rysunek 6 [5]. Cewki uzwojenia elektromagnesu o kształcie prostokątnym lub owalnym (1) zasilane są ze źródła prądu stałego prądem o określonej gęstości w sposób przeciwny. Uzwojenie umieszczone jest na konstrukcji nośnej (2) wykonanej z materiału niemagnetycznego, które przeciwdziała siłom elektrodynamicznym pochodzącym od prądu cewek.



Rys. 6. Jedno z możliwych rozwiązań konstrukcyjnych elektromagnetycznego separatora odchylającego (opis oznaczeń w tekście)

Przyjęto, że odstęp pomiędzy osiami uzwojenia wynosi  $2\tau$ . W odległości „ $i$ ” od uzwojenia, wymaganej względami izolacji (np. cieplnej w przypadku uzwojenia nadprzewodzącego), umieszczony jest kanał separacyjny (3), którego szerokość wynosi  $K = h_k - i$ . Główne wymiary kanału, które decydują o wydajności separacji to głębokość „ $w$ ” i wysokość „ $L$ ”. Separowana mieszanina wprowadzana jest do kanału i przepływa przez niego ze stałą prędkością „ $v$ ”. Zakłada się jej laminarny przepływ w strefie separacji. Na wyjściu kanału znajduje się przegroda w odległości  $d_k$  od uzwojenia, która rozdziela mieszaninę na produkty separacji: koncentrat i odpady.

Często spotykane konstrukcje magnetycznych separatorów bazują na elektromagnesach, w których uzwojeniem są solenoidy pracujące w układzie kwadrupolowym. Dla wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w takich uzwojeniach i wokół nich, uzwojenie elektromagnesu dzieli się na elementarne pętle prądowe. Pole magnetyczne wzbudzone przez całe uzwojenie jest sumą pól wzbudzanych przez poszczególne pętle elementarne. Obliczenia pola całkowitego dokonuje się numerycznie. Opisaną sytuację przedstawia rysunek 7, na którym przedstawiono szkic sytuacyjny rozmieszczenia uzwojeń i oznaczono wymiary cewek. Przyjęto do obliczeń cylindryczny układ współrzędnych [6].



Rys. 7. Gabaryty uzwojenia i oznaczenia niezbędne do numerycznego wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora

Punktem wyjścia do obliczeń jest zależność natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$  od wektorowego potencjału magnetycznego  $\vec{A}$  w postaci:  $d\vec{H} = \nabla \times d\vec{A}$ . Wektorowy potencjał magnetyczny dla pojedynczej pętli elementarnej, przez którą przepływa prąd o gęstości  $\vec{J}$  określony jest zależnością:

$$(8) \quad d\vec{A}(r, z) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\vec{J} dV}{R}$$

gdzie  $R$  jest odległością punktu  $P(r, z)$  w obszarze separatora od pętli elementarnej (wg oznaczeń przedstawionych na rysunku 7), a  $dV$  jest objętością pętli.

Po wykonaniu niezbędnych obliczeń i przekształceń, składowe pola magnetycznego, w walcowym układzie współrzędnych, wynoszą odpowiednio: [6]

$$(9) \quad dH_r = \frac{J da db (z-b)}{2\pi \sqrt{(a+r)^2 + (z-b)^2}} \left\{ -K(k^2) + \frac{a^2 + r^2 - (z-b)^2}{(a-r)^2 + (z-b)^2} E(k^2) \right\}$$

$$(10) \quad dH_z = \frac{J da db}{2\pi\sqrt{(a+r)^2 + (z-b)^2}} \left\{ -K(k^2) + \frac{a^2 - r^2 - (z-b)^2}{(a-r)^2 + (z-b)^2} E(k^2) \right\}$$

gdzie:  $K(k^2)$  i  $E(k^2)$  są całkami zupełnymi eliptycznymi odpowiednio pierwszego i drugiego rodzaju, natomiast  $k^2 = 4ar/(a+r)^2 + (z-b)^2$ .

Składowe natężenia pola magnetycznego  $H_r$  i  $H_z$  można następnie znaleźć poprzez całkowanie zależności (9 i 10) po całym polu przekroju uzwojeń.

Pole magnetyczne jest symetryczne względem osi, tak więc w dalszej analizie rozkładu pola można ograniczyć się do pierwszej ćwiartki układu przedstawionego na rysunku 7.

Dla danej gęstości prądu  $\vec{J}$  jednorodnej w całym przekroju uzwojenia, pole magnetyczne (tj. składowe  $H_r$  i  $H_z$  oraz  $H = \sqrt{H_r^2 + H_z^2}$ ) zależy tylko od położenia punktu  $P(r, z)$  i kształtu uzwojenia. Dla porównania różnych kształtów uzwojenia, wprowadza się względne współrzędne:  $\rho = r/a_1$ ,  $\xi = z/a_1$  ( $a_1$  jest wewnętrznym promieniem uzwojenia), natomiast geometrię uzwojenia opisuje się parametrami:  $\alpha = a_2/a_1$ ,  $\beta_1 = b_1/a_1$  oraz  $\beta_2 = b_2/a_1$ . Następnie poprzez podstawienie do wzorów (9 i 10) tych oznaczeń, otrzymuje się zależności:

$$(11) \quad H_r = Ja_1 F_r(\rho, \xi, \alpha, \beta_1, \beta_2)$$

$$(12) \quad H_z = Ja_1 F_z(\rho, \xi, \alpha, \beta_1, \beta_2)$$

$$(13) \quad H = Ja_1 F(\rho, \xi, \alpha, \beta_1, \beta_2)$$

gdzie:  $F_r$ ,  $F_z$  i  $F = \sqrt{F_r^2 + F_z^2}$  są funkcjami tylko  $\rho$ ,  $\xi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_1$  i  $\beta_2$ .

Oznacza to, że w układzie cylindrycznym, dla takich samych kształtów, lecz różnych wymiarów, wartości pola magnetycznego w odpowiadających sobie pozycjach są proporcjonalne do wielkości  $Ja_1$ .

Zdolność separatora do ekstrakcji cząstek magnetycznych zależy – w ogólności – od gęstości siły pola magnetycznego. Dla rozpatrywanej konfiguracji uzwojenia, wartość składowej promieniowej gęstości siły magnetycznej, która odgrywa istotną rolę w procesie odchylenia cząstek w przestrzeni separatora, zapisuje się w postaci:

$$(14) \quad |\vec{f}| = \left| \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) (1/2) HB_0 \right|$$

lub z wykorzystaniem wprowadzonych wyżej oznaczeń:

$$(14a) \quad |f_r| = \mu_0 J^2 a_1 G(\rho, \xi, \alpha, \beta_1, \beta_2)$$

gdzie:  $G = \left| F \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) F \right|$

W [6] prezentowane są rezultaty obliczeń rozkładu pola magnetycznego w przestrzeni separatora w oparciu o zależność (14a). Na ich podstawie stwierdzono, że gabaryty uzwojenia, które wzbudzają pole magnetyczne o dużej niejednorodności, określone są następującymi związkami:

$$(15) \quad \begin{aligned} \alpha &= a_2/a_1 = 1.37 \\ \beta_1 &= b_1/a_1 = 0.25 \\ \beta_2 &= b_2/a_1 = 0.625 \end{aligned}$$

Wskazują one, że optymalna konfiguracja uzwojenia to kwadrat. Dla tak dobranych gabarytów uzwojenia i dla założonej równomiernej gęstości prądu w uzwojeniu:  $J = 1.61 \cdot 10^8 \text{ Am}^{-2}$  wykonano obliczenia numeryczne rozkładu pola magnetycznego i gęstości siły magnetycznej w przestrzeni roboczej separatora. Rezultaty przeprowadzonych obliczeń prezentowane są w postaci graficznej w [7].

## Wnioski

W artykule wskazano, że zarówno statyczne pole elektryczne jak i magnetyczne znajdują praktyczne zastosowanie w inżynierii mineralnej (przeróbce kopalni).

Specyfika separacji elektrycznej sprowadza się do selektywnego naelektryzowania ziaren rozdzielanej mieszaniny. Autor wykorzystał w tym celu efekt elektryzowania przez tarcie. Użyty jako elektryzator cyklon gwarantuje uzyskiwanie znacznych wartości ładunków, co wykazały badania eksperymentalne. Znak ładunku zależy od materiału, z którego wykonany jest cyklon. Negatywne strony elektryzowania w cyklonie to: konieczność równomiernego wypływu naelektryzowanych ziaren z cyklonu w obszar działania pola elektrycznego i stosowanie wąskich klas ziarnowych.

W procesie separacji magnetycznej konieczne jest wzbudzenie w znacznym obszarze separacji silnie niejednorodnego pola magnetycznego. W separatorze odchylającym niejednorodność tę uzyskuje się poprzez dobór kształtu uzwojeń, ich gabarytów i wzajemnego usytuowania. Przedstawione w niniejszej pracy zależności analityczne opisują rozkład pola magnetycznego i gęstości siły magnetycznej uzależniając je od podstawowych parametrów uzwojenia. Uwzględniono także gęstość prądu zasilania uzwojenia.

**Autor:** prof.nz. AGH, dr hab. inż. Antoni **Cieśla**, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [aciesla@agh.edu.pl](mailto:aciesla@agh.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Sztaba K.: *Inżynieria mineralna*, Journal of the Polish Mineral Engineering Society, styczeń – czerwiec 2000, pp. 3 – 10.
- [2] TAO Daniel, FAN Mao-ming JIANG Xin-kai: *Dry coal fly ash cleaning using rotor triboelectrostatic separator*, Mining Science and Technology 19 (2009), pp. 642 - 647.
- [3] Cieśla A.: *Tryboelektryzacja ziaren w cyklonie. Analiza wpływu wybranych czynników*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, 2015 R. 91 nr 12, s. 65–68.
- [4] Cieśla A.: *Badania eksperymentalne ruchu strugi naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 89, Nr. 12/2013, pp. 215 – 218
- [5] Kopp J.: *The physics of "Falling Curtain" dry magnetic separation*, International Journal of Mineral Processing, 10 (1983) pp. 297 – 308.
- [6] Gerber R., Watmough M. H.: *A design of a superconducting split – coil open gradient magnetic separator* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag.-21, No. 5, September 1985, pp. 2053 – 2055.
- [7] Cieśla A.: *Oddziaływanie statycznego pola magnetycznego naparamagnetyczne cząstki w magnetycznym separatorze odchylającym*, Materiały konferencyjne XXVII IC SPETO, 2004, pp. 21- 24