

# **POLE MAGNETYCZNE, PARAMETRY I CHARAKTERYSTYKI SEPARATORA ELEKTRODYNAMICZNEGO**

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor:

**Prof. nadzw. dr hab. Grzegorz Kamiński**

- 2.1. Przegląd metod numerycznej analizy pola elektromagnetycznego
  - 2.2. Formalizm pola elektromagnetycznego stosowany w analizie numerycznej
    - 2.2.1. *Analiza przestrzenna*
    - 2.2.2. *Analiza harmoniczna*
  - 2.3. Dwuwymiarowy model magnetostatyczny separatora
    - 2.3.1. *Struktura modelu, zakres badań i algorytm obliczeń*
    - 2.3.2. *Rozkład wektora indukcji wewnątrz wzbudnika i w strefie aktywnej separatora*
    - 2.3.3. *Wpływ parametrów wzbudnika na wartość strumienia aktywnego*
    - 2.3.4. *Obliczenie mocy strat w rdzeniu separatora*
  - 2.4. Dwuwymiarowy model separatora o wymuszeniu harmonicznym
    - 2.4.1. *Pole magnetyczne w strefie aktywnej separatora*
    - 2.4.2. *Rozkład prądów indukowanych w cząstce przewodzącej*
    - 2.4.3. *Sily działające na cząstkę przewodzącą*
    - 2.4.4. *Wpływ parametrów separowanej cząstki na wartość siły separacji*
    - 2.4.5. *Wpływ parametrów wzbudnika na wartość sił działających na separowaną cząstkę*
  - 2.5. Model przestrzenny separatora
    - 2.5.1. *Prądy indukowane w cząstce przewodzącej*
    - 2.5.2. *Sily działające na separowaną cząstkę*
  3. **BADANIA WERYFIKUJĄCE MODEL MATEMATYCZNY SEPARATORA**
    - 3.1. Opis konstrukcji modelu laboratoryjnego separatora elektrodynamicznego
    - 3.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe
    - 3.3. Pomiar siły działającej na przewodzącą cząstkę umieszczoną w strefie aktywnej separatora
    - 3.4. Wpływ częstotliwości zasilania na efekty separacji
  4. **PODSUMOWANIE**
  5. **PROPOZYCJE DAJSZYCH KIERUNKÓW BADAŃ W DZIEDZINIE SEPARATORÓW ELEKTRODYNAMICZNYCH**
  6. **LITERATURA**
- Praca zawiera 95 stron, 77 rysunków, 3 fotografie, 92 pozycje literatury.

## **WSTĘP**

Separacja elektrodynamiczna jest procesem rozdzielania materiałów nieferromagnetycznych o zróżnicowanej rezystywności przy wykorzystaniu oddziaływań pola elektromagnetycznego. Najczęściej zadanie separacji sprowadza się do wydzielenia cząstek przewodzących i niemagnetycznych spośród cząstek nieprzewodzących. Problem ten nabiera, w ostatnich latach, dużego znaczenia z uwagi na szybko postępującą automatyzację produkcji i problemy z utylizacją odpadów.

nieferromagnetyczne ilością ok. 10% masy. Utylizacja tego typu złomu jest skomplikowanym, na ogół wielostopniowym procesem technologicznym. Poszczególne etapy odzyskiwania surowców wtórnych ze złomu obejmują: kruszenie, oddzielanie magnetyczne, pneumatyczne, grawitacyjne, rozdzielanie w cieczach ciężkich zawiesinowych i elektrodynamiczne. Rola separacji elektrodynamicznej w tym procesie jest znaczna i polega na oddzielaniu cząstek metali nieferromagnetycznych od cząstek z tworzyw sztucznych. Separatory mogą być także stosowane do oddzielania różnych metali kolorowych od siebie, głównie aluminium i cynku.

Innym obszarem zastosowania separacji elektrodynamicznej jest utylizacja odpadów komunalnych. Zawartość metali nieżelaznych w odpadach bytowych wynosi wagowo ok. 1-1,5%. Ta raczej niewielka ilość reprezentuje mimo wszystko kilkanaście procent dochodu jaki można uzyskać ze sprzedaży posegregowanych surowców wtórnych. Ze względu na wysoką cenę złomu metali kolorowych opłacalne staje się stosowanie w procesie utylizacji separatorów elektrodynamicznych. Najbardziej pożądane i cenne jest aluminium ze względu na wysokie koszty jego wytwarzania. Jednocześnie jest ono wraz z magnezem najłatwiejsze do oddzielania.

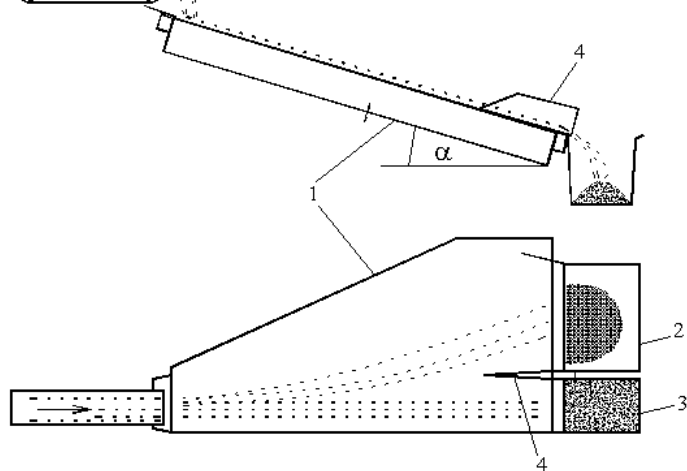
Względy te przemawiają za celowością odzyskiwania metali nieferromagnetycznych z odpadów komunalnych i przemysłowych. W dobie gospodarki proekologicznej rozwój produkcji przemysłowej bez rozwiązania problemu odzyskiwania surowców będzie bardzo utrudniony.

Także w dziedzinie automatyzacji procesów produkcyjnych separacja elektrodynamiczna odgrywa znaczącą rolę. Potrzeba rozdzielania strumienia mieszaniny drobnych cząstek zachodzi w procesach technologicznych przy oddzielaniu drobnych detali produkcyjnych (części urządzeń, końcówki przewodów itp.) od ściernych elementów ceramicznych wykorzystywanych przy obróbce tych detali oraz od zanieczyszczeń. Konieczność zwiększania produkcji przy jednoczesnym zmniejszaniu jej kosztów powoduje konieczność zautomatyzowania procesów segregacji, porządkowania lub przemieszczania detali produkcyjnych oraz prefabrykatów podczas obróbki mechanicznej.

Separatory elektrodynamiczne współpracujące z separatorami magnetycznymi i urządzeniami do wykrywania metali pełnią ważną rolę nawet w przemyśle, gdzie nie jest wymagana wysoka czystość produktu. Rola tych urządzeń polega na ochronie maszyn przetwarzających produkt przed elementami metalowymi powodującymi ich przedwczesne zużycie a nawet poważne awarie.

Stosowane w procesach separacji urządzenia, zwane separatorami, mają bardzo zróżnicowaną budowę. Różnice konstrukcyjne wynikają z różnych własności rozdzielanych elementów. Największy wpływ na wybór określonego typu separatora mają właściwości konstytutywne cząstek przewodzących, ich gabaryty i kształt. Przy projektowaniu i konstruowaniu separatorów elektrodynamicznych napotyka się na spore trudności. Urządzenia te są wytworami jednostkowymi trudno poddającymi się standaryzacji. Chociaż pierwsze pomysły i patenty dotyczące separacji pojawiły się niemal sto lat temu, to projektowanie tych urządzeń nadal stanowi otwarty problem. Powodem tego stanu rzeczy są małe doświadczenia w projektowaniu i konstruowaniu tego typu urządzeń z jednej strony a pojawianie się coraz nowocześniejszych materiałów elektrotechnicznych z drugiej.

## **KONSTRUKCJA SEPARATORA OPRACOWANA PRZEZ AUTORA ROZPRAWY**



Rys.1. Schemat separatora według koncepcji autora. 1- wzbudnik, 2- pojemnik na elementy przewodzące, 3- pojemnik na elementy nieprzewodzące, 4- rozdzielacz strumienia.

Pole magnetyczne jest wytwarzane przez wzbudnik zbliżony budową do wzbudnika silnika liniowego lecz o specjalnie dobranych parametrach zapewniających wytworzenie dużej indukcji magnetycznej na powierzchni strefy aktywnej i fali o małej długości. Na cząstki metaliczne działa siła Lorentza powodująca ich odchylenie od początkowego toru i przedostanie się ich poza rozdzielacz strumienia (4). Elementy przewodzące zbierane są w pojemniku (2). Siła działa prostopadle do początkowego kierunku prędkości strumienia zgodnie z kierunkiem przemieszczania się fali wędrującego pola magnetycznego. Cząstki nieprzewodzące zsuwają się do pojemnika (3) nie doznając odchylenia.

W dostępnej literaturze publikacje dotyczące obliczeń sił działających na cząstkę separowaną w przypadku separatora o wzbudzeniu elektromagnetycznym są bardzo ogólne i fragmentaryczne a stosowane metody analizy dosyć uproszczone. Brak zupełnie publikacji, w których autorzy podają parametry i charakterystyki eksploatacyjne separatora o takiej zasadzie działania.

## CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie rozkładu pola elektromagnetycznego w separatorze elektrodynamicznym z wędrującym polem magnetycznym oraz wyznaczenie, na tej podstawie,

1. W oparciu o modele polowe separatora możliwe jest zbadanie wpływu: parametrów wzbudnika, częstotliwości zasilania oraz parametrów cząstki separowanej na wielkość siły separacji.
2. Do zbadania wpływu parametrów wzbudnika na wielkość aktywnego strumienia magnetycznego można wykorzystać dwuwymiarowy magnetostatyczny model polowy separatora.
3. Otwarty charakter obwodu magnetycznego i powietrzna strefa aktywna separatora pozwala na pominięcie nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzenia w procesie obliczania sił działających na przewodzącą cząstkę.
4. Dla dokładnego wyznaczenia sił działających na cząstkę przewodzącą z uwzględnieniem efektów brzegowych związanych z ograniczonym wymiarem cząstki separowanej w osi  $Z$  niezbędne jest zbudowanie polowego modelu przestrzennego separatora.
5. Dolną granicę wielkości separowanych cząstek stanowi wymiar podziałki biegunowej wzbudnika.
6. Dolna granica konduktywności separowanych cząstek leży w zakresie 20 MS/m co odpowiada w przybliżeniu konduktywności magnezu i cynku.

W celu wykazania słuszności przedstawionych tez sformułowano model matematyczny wybranej konstrukcji separatora oraz dokonano analizy pola magnetycznego przy użyciu metody elementów skończonych. Wyniki obliczeń polowych porównano z wynikami badań modelu fizycznego separatora.

## **DWUWYMIAROWY MODEL MAGNETOSTATYCZNY SEPARATORA ELEKTRODYNAMICZNEGO.**

Analizę pola magnetycznego w separatorze przeprowadzono przy następujących założeniach upraszczających:

- Rozpatrzono nieliniowe, dwuwymiarowe zagadnienie magnetostatyczne odpowiadające przekrojowi poprzecznemu wzbudnika prostopadłemu do osi prętów uzwojenia.
- Pominięto strumienie rozproszenia wokół połączeń czołowych uzwojenia.
- Przyjęto, że całkowity strumień zamyka się w jarzmie wzbudnika.
- Rozwiązanie zagadnienia przeprowadzono metodą elementów skończonych pierwszego rzędu.

Magnetostatyczny model MES separatora przedstawiono na rys. 1. Model obejmuje półtoję podziałki żłobkowej  $t$  co odpowiada połowie podziałki biegunowej  $\tau$  dla uzwojenia trójfazowego o liczbie żłobków na biegun i fazę  $q = 1$ . W wyniku rozwiązania pola w takim obszarze otrzymuje się najmniejszy, reprezentatywny, nie wykazujący już cech symetrii fragment pola rzeczywistego separatora w stanie statycznym, odpowiadający chwili czasowej  $\pi/6$  w układzie trójfazowym.

Powyższe parametry można zmieniać niezależnie w szerokich granicach. Wartość gęstości prądu w prętach obliczana jest na podstawie zależności:

$$j_s = \sqrt{\frac{2P_u \gamma_{cu}}{b_m h_m}}$$

gdzie:  $\gamma_{cu}$  - konduktywność materiału pręta,  $b_m$  - szerokość zęba.

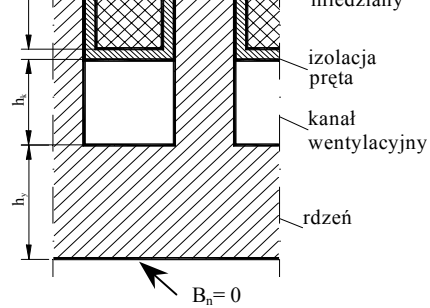
Przyjęcie gęstości prądu według powyższej formuły zapewnia zachowanie stałej, założonej wartości strat Joule'a w przecie, niezależnie od wymiarów pręta. Przy czym, w przecie pasma fazowego A gęstość prądu równa jest  $j_s/2$ . Obraz pola magnetycznego uzyskany przy takich założeniach odpowiada zasilaniu uzwojeń prądem sinusoidalnym o amplitudzie gęstości  $j_s$  w chwili czasowej  $\pi/6$ . Wybór takiej chwili czasowej umożliwia uzyskanie reprezentatywnego obrazu pola w obszarze obejmującym połowę podziałki biegunowej wzbudnika i przyjęcie dogodnych warunków brzegowych, które zaznaczono na rysunku 2.

Założono brak składowej stycznej indukcji magnetycznej na symetralnej żłobka fazy C i brak składowej normalnej na osi bieguna magnetycznego. W prezentowanym modelu przyjęto, że cały strumień zamyka się w jarzmie a w odległości  $h_p$  od wierzchołków zębów indukcja magnetyczna jest pomijalnie mała.

Cały obszar modelu był automatycznie dzielony na około 20000 do 30000 trójkątnych elementów skończonych pierwszego rzędu, tak aby błędy numeryczne nie przekraczały 2-3%. Istnieje możliwość dalszego zmniejszenia błędów poprzez zastosowanie sześciokątowych elementów drugiego rzędu.

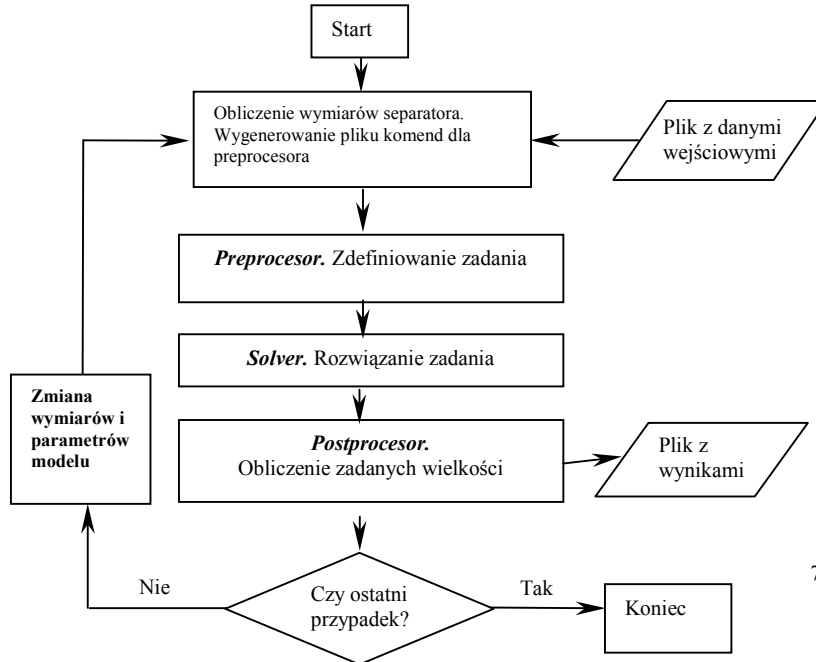
Prezentowany model umożliwia wykonanie obliczeń polowych dla dowolnego zbioru parametrów. Jednakże zakres badań obejmował obliczenie rozkładu pola dla zmiennych:  $t$ ,  $h_m$  i  $P_u$ , jako mających największy wpływ na parametry i charakterystyki separatora. Wartości pozostałych zmiennych są stałe i równe:  $\delta = 0,2$  mm,  $b_d = 3$  mm,  $h_y = 10$  mm,  $h_k = 1$  mm.

Wysokość warstwy powietrza nad powierzchnią aktywną  $h_p$  przyjęto 20 mm. Badania wpływu wysokości kanału wentylacyjnego na rozkład pola nie wchodzi w zakres niniejszej pracy. Wprowadzenie kanału wentylacyjnego podyktowane zostało możliwością przeprowadzenia obliczeń cieplno-wentylacyjnych w dalszych etapach badań separatorów.



Rys.2. Magnetostacyjny model polowy separatora.

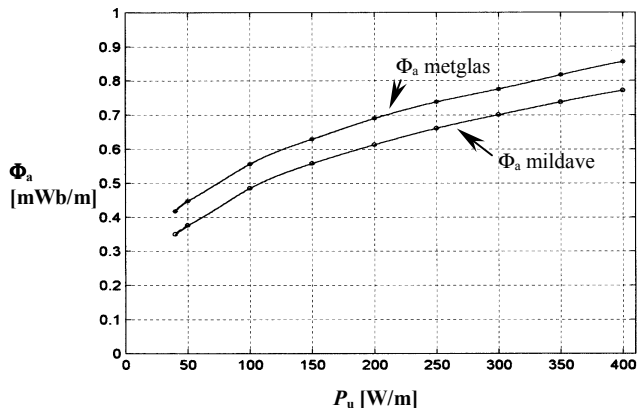
Opracowano algorytm automatyzacji obliczeń polowych, który znacznie przyspieszył badania wpływu wymiarów wzbudnika separatora na jego parametry. Schemat algorytmu przedstawiono na rysunku 3.



głębokość żłobka oraz wartość strat w przecię uzwojenia. Istotne są także parametry magnetyczne materiału, z którego wykonany jest rdzeń wzbudnika.

Zwiększenie strumienia aktywnego można uzyskać na drodze zwiększenia strat w przecię co pociąga za sobą konieczność intensyfikacji chłodzenia. Na rysunku 4. przedstawiono zależność strumienia aktywnego  $\Phi_a$  od mocy strat  $P_u$ . Zwiększenie dopuszczalnych strat w żłobku do 150 W/m spowoduje zwiększenie strumienia aktywnego o ok. 50%. Uzyskana zostanie w ten sposób także pewna oszczędność materiału. Z przedstawionej na rysunku 5. zależności optymalnej głębokości żłobka od mocy strat w żłobku wynika że optymalny żłobek będzie o 30% płytszy.

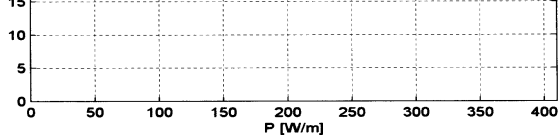
Przeprowadzone obliczenia potwierdzają wyniki badań prezentowane w literaturze i wskazują jednocześnie na dość istotną rolę materiału, z którego będzie wykonany rdzeń. Taśma amorficzna Metglas zapewnia uzyskanie większego, o kilkanaście procent, strumienia aktywnego niż blacha



zinnowalcowana Mildave (rys.4.).

Rys. 4. Zależność strumienia aktywnego od mocy strat w żłobku.

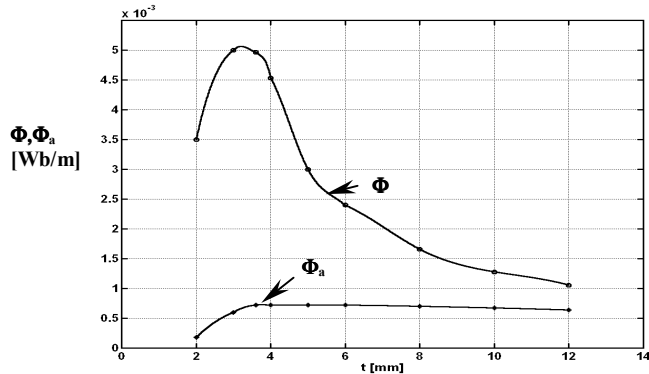


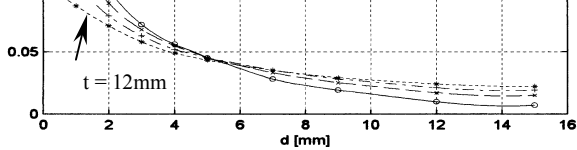


Rys. 5. Zależność optymalnej głębokości żłobka od mocy strat w żłobku.

Zależność strumieni całkowitego i aktywnego od wielkości podziałki żłobkowej przy stałych stratach w przecie  $P_u = 200 \text{ W/m}$  i dla stałej głębokości żłobka  $h = 44 \text{ mm}$ , przedstawiono na rysunku 6. Zwiększanie podziałki powoduje początkowo znaczny wzrost strumieni ze względu na zwiększenie przepływu żłobkowego. Strumień całkowity, po osiągnięciu maksimum, maleje wraz z dalszym powiększaniem podziałki. Przyczyną tego jest zwiększanie reluktancji obwodu magnetycznego. Strumień aktywny ma słabo zaznaczone maksimum, przy czym występuje ono dla nieco większej podziałki żłobkowej niż maksimum strumienia całkowitego.

Zwiększanie podziałki żłobkowej powyżej optymalnej nie powoduje znacznego spadku strumienia aktywnego. Zmienia się natomiast rozkład indukcji w strefie aktywnej (rys. 7). Dla większych podziałek indukcja na powierzchni wzbudnika jest mniejsza lecz jej wartość wolniej maleje na większych wysokościach. Właściwy dobór podziałki żłobkowej zorientowany musi być zatem na uzyskanie maksymalnych sił działających na separowane cząstki.





Rys. 7. Profile pola w strefie aktywnej dla różnych podziałek żłbkowych.

### DWUWYMIAROWY MODEL SEPARATORA O WYMUSZENIU HARMONICZNYM.

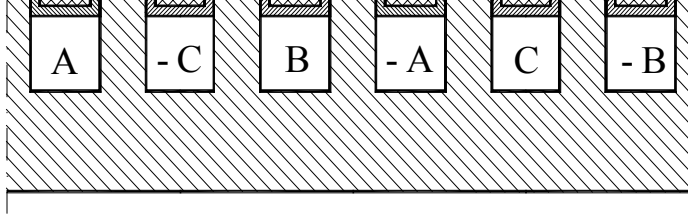
Do obliczenia sił działających na separowaną cząstkę, konieczne jest opracowanie modelu, który uwzględni indukowanie się prądów wirowych w przekroju przewodzącej cząstki. Najprostszym modelem, który spełnia ten warunek jest model harmoniczny dwuwymiarowy. Powstał on w wyniku zmodyfikowania modelu statycznego poprzez rozszerzenie rejonu wzbudnika do dwóch podziałek biegunowych, wprowadzenie regionu przewodzącego do strefy aktywnej oraz postawienie okresowych warunków brzegowych na lewym i prawym brzegu modelu (rys. 8.).

Parametrami określającymi właściwości cząstki są:

- $d$  – grubość,
- $l$  – długość,
- $e$  – odległość dolnej krawędzi cząstki od powierzchni wzbudnika,
- $\gamma$  – konduktancja materiału cząstki.

Poszczególnym prętom uzwojenia wzbudnika przypisano następujące wartości gęstości prądu:

$$j_A(t) = j_m \sin(\omega t), \quad j_B(t) = j_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad j_C(t) = j_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$



Rys.8. Model harmoniczny separatora.

W modelu harmonicznym nie uwzględniono nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia. Stała wartość przenikalności rdzenia została dobrana w taki sposób aby strumień aktywny był równy wartości strumienia aktywnego obliczonego w modelu magnetostatycznym dla takich samych wymiarów i wymuszenia. Wyznaczone wartości magnetycznej przenikalności względnej, przy spełnieniu tego warunku, zawierały się w przedziale od 300 do 400.

**Siły działające na cząstkę przewodzącą.**

W rozpatrywanym przypadku oddziaływań elektrodynamicznych istotne znaczenie mają tylko siły objętościowe, ponieważ cząstka separowana jest ośrodkiem przewodzącym i paramagnetycznym a otaczająca ją strefa aktywna jest również paramagnetykiem. Gęstość sił objętościowych można bezpośrednio otrzymać z tensora naprężeń w postaci

$$f_i = \frac{\partial T_{ji}}{\partial \xi_i} \quad (i,j,k = 1, 2, 3 - x,y,z)$$

Powyzsza zależność prowadzi do znanego związku Lorentza na siłę elektrodynamiczną zależną od indukcji magnetycznej i gęstości prądu w obszarze przewodzącym prąd:

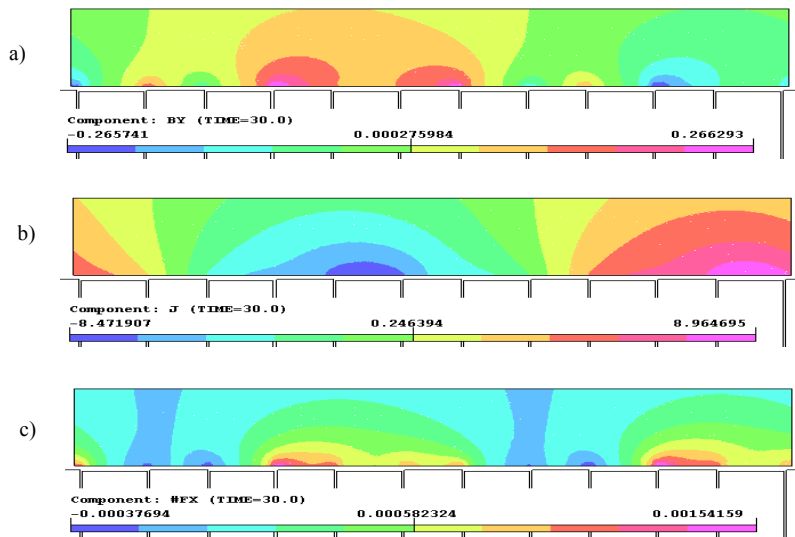
$$f_i = \epsilon_{ijk} B_j j_k$$

gdzie:  $\epsilon_{ijk}$  - symbol Ricciego.

Ze względu na jednoskładowość wektora gęstości prądu i płaskorównoległy rozkład pola magnetycznego, gęstość siły objętościowej ma dwie składowe:

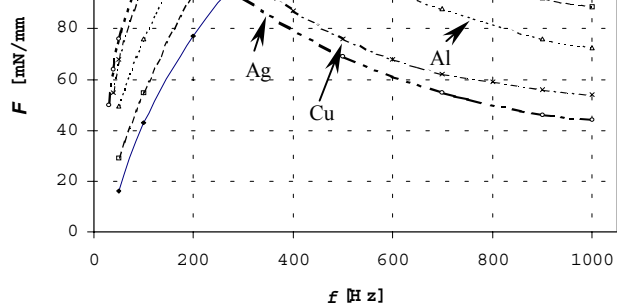
$$f_x = j_z B_y, \quad f_y = j_z B_x$$

siły separującej  $f_x$  występuje tylko w obszarach cząstki, gdzie w danej chwili czasowej jednocześnie płynie prąd i występuje duża składowa pionowa indukcji magnetycznej. Na rysunku 9. przedstawiono mapy indukcji magnetycznej w obszarze cząstki, gęstości prądu i gęstości siły separującej w chwili czasowej 30 stopni elektrycznych dla cząstki o długości dwóch podziałek biegunowych. Największą wartość gęstość siły osiąga nad zębami. Zauważyć można także niewielkie obszary gdzie gęstość siły separującej jest ujemna. W tych miejscach zwroty wektorów indukcji magnetycznej i gęstości prądu determinują powstawanie sił o przeciwnym zwrocie. W przypadku cząstki o długości  $l > 2\tau$  dominują obszary, w których gęstość siły ma wartość dodatnią, zatem wypadkowa siła działająca na cząstkę ma stosunkowo dużą wartość. Dodatnią wartość gęstości siły należy interpretować jako zwrot wektora siły zgodny z ze zwrotem osi  $X$  układu współrzędnych.



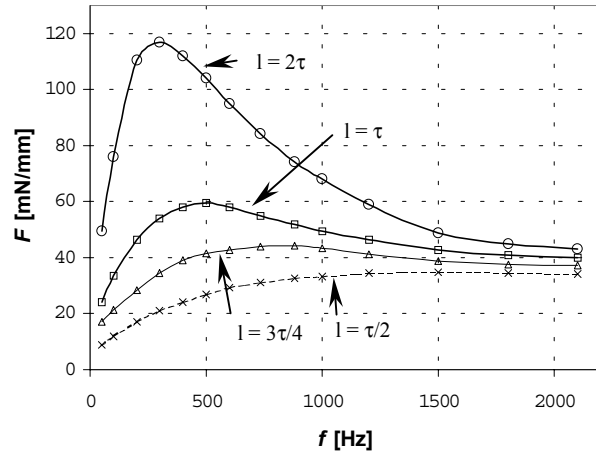
Rys.9. Rozkład pola indukcji magnetycznej  $B_y$  (a), gęstości prądu  $j$  (b) i gęstości siły  $f_x$  (c) w cząstce o długości  $l \approx 2\tau$

Rysunek 10. przedstawia charakterystyki częstotliwościowe siły separacji  $F_x$  dla cząstek o takich samych wymiarach różniących się jedynie konduktywnością. Maksymalna siła jest dla wszystkich cząstek jednakowa. Nie zależy więc od konduktywności. Uzyskiwana jest jednak przy



Rys. 10. Charakterystyki częstotliwościowe dla próbek o wymiarach  $d = 3\text{mm}$ ,  $l = 66\text{ mm}$ .

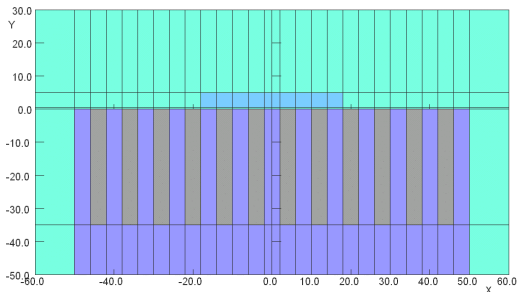
Rysunek 11. przedstawia zależność siły separacji  $F_x$  od częstotliwości dla cząstki aluminiowej. Charakterystyki wyznaczono dla parametru  $l = \tau/2$ ,  $3\tau/4$ ,  $\tau$ ,  $2\tau$ . Wpływ częstotliwości na wartość siły jest znaczny. Dobierając odpowiednią częstotliwość do parametrów cząstki można uzyskać nawet czterokrotne zwiększenie siły separującej dla cząstki o długości  $l = 2\tau$ . Siła separacji zmniejsza się znacznie dla cząstek krótszych a maksima siły przesuwają się w stronę wyższych częstotliwości. Maleje także efekt doboru optymalnej częstotliwości. Przebieg charakterystyki dla cząstki o długości  $l = \tau/2$  nie wykazuje już ekstremum.



jego możliwości ograniczają się do rozwiązania tylko 50 tysięcy równań. Do celów dokładnego modelowania maszyn i urządzeń elektrycznych to stanowczo za mało.

Na rysunku 12. przedstawiono przekrój modelu w płaszczyźnie  $XY$ . Kolorem granatowym oznaczono rdzeń separatora. W rdzeniu wycięte jest 12 żłobków oznaczonych kolorem szarym, w których umieszczono uzwojenia. Częstka przewodząca umieszczona nad wzbudnikiem oznaczona jest kolorem błękitnym. Wzbudnik z boków i z góry otoczony jest obszarami powietrznymi (kolor zielony).

W celu ograniczenia liczby zmiennych potencjał wektorowy przypisano tylko obszarowi cząstki przewodzącej. W pozostałych obszarach zastosowano skalarny potencjał całkowity (ang.: total scalar potential) i zredukowany (ang.: reduced scalar potential).



Rys. 12. Przekrój modelu przestrzennego separatora.

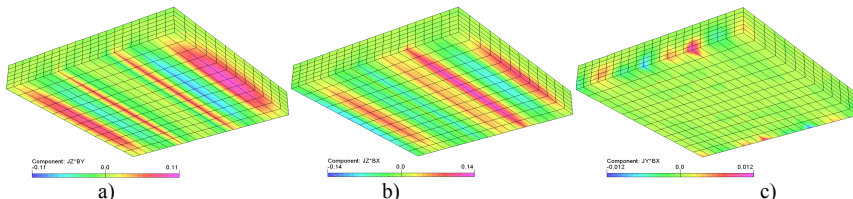
W wyniku rozwiązania modelu otrzymano rozkład pola magnetycznego w rdzeniu wzbudnika (rys. 13.) oraz w otaczających go obszarach powietrznych i cząstce przewodzącej.



Rys. 13. Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu wzbudnika w chwili 30 st. el.

**Siły działające na separowaną cząstkę obliczone w modelu trójwymiarowym**

W wyniku oddziaływania pola gęstości prądów  $\mathbf{j}$  i pola gęstości strumienia magnetycznego (indukcji)  $\mathbf{B}$  powstaje pole gęstości sił objętościowych  $\mathbf{f}$ . W wyniku scałkowania składowej  $f_x$  w objętości cząstki otrzymuje się wartości chwilową siły separacji. Zwroty wektora  $f_x$  mogą być przeciwnie w różnych obszarach cząstki, co zostało uwidocznione na rysunku 14. Zawartość składowej  $f_x$  o przeciwnym znaku maleje w miarę oddalania się od powierzchni wzbudnika. Składowa  $f_y$  powoduje lewitację cząstki. Jej rozkład ma podobny charakter jak składowej  $f_x$ .



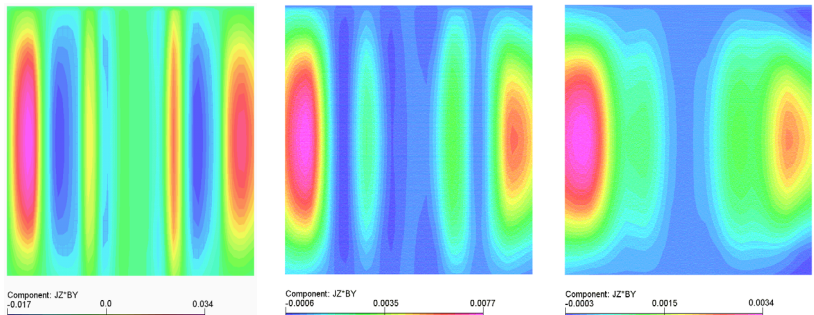
Rys. 14. Wartość gęstości sił objętościowych na powierzchni cząstki przewodzącej w chwili czasowej 30 st. el. a) składowa  $f_x$ , b) składowa  $f_y$ , c) składowa  $f_z$ .

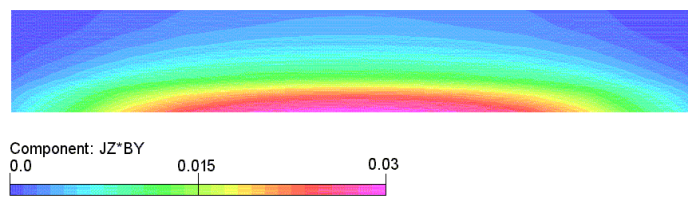
Godnym uwagi jest fakt występowania obszarów ze składową  $f_z$ . Jednak wielkości obszarów o zwrotach dodatnich i ujemnych są jednakowe w każdej chwili. Efektem działania tych sił jest jedynie powstawanie naprężeń w cząstce.

Obliczona siła działająca na cząstkę w osi Z:

$$F_z = \frac{1}{T} \int_0^T \iiint_V \mathbf{j}_y \times B_x \, dv \, dt \quad \text{jest równa zeru.}$$

Profile pola gęstości sił na różnych wysokościach przedstawiono na rysunku 15.





Rys. 16. Profil gęstości siły separującej w płaszczyźnie YZ w miejscu występowania maksimum gęstości.

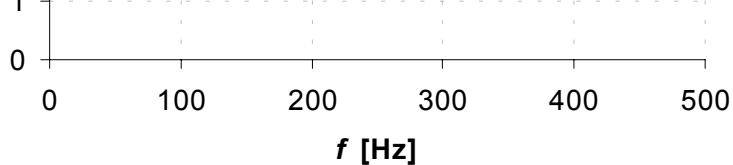
Siły działające na separowaną cząstkę wyznaczone z modelu dwuwymiarowego są obciążone błędem systematycznym spowodowanym nie uwzględnieniem zjawisk brzegowych. Ze względu na małe wymiary cząstki zjawiska te w znaczący sposób wpływają na wartość prądów indukowanych i sił działających na cząstkę.

Wartość gęstości siły separującej nie jest stała w osi  $Z$  ale maleje podobnie do zmian gęstości prądu. Nie można zatem dokładnie wyznaczyć sił działających na cząstkę w oparciu o model dwuwymiarowy.

Na rysunku 17. porównano charakterystyki częstotliwościowe separatora uzyskane z obliczeń numerycznych 2D i 3D oraz z badań modelu laboratoryjnego separatora (LAB). Pomiędzy wartościami sił obliczonych według modeli 2D i 3D zaobserwować można znaczne różnice. Przebieg charakterystyk jest jednak podobny a maksima siły separującej występują przy takich samych częstotliwościach. Model 2D może służyć do wstępnego wyznaczenia parametrów separatora. Biorąc pod uwagę powszechną dostępność programów 2D oraz znacznie mniejszą czasochłonność obliczeń i wymagania sprzętowe dwuetapowy proces projektowania separatora jest godny polecenia.

Harmoniczny model 3D także nie jest dokładny, gdyż posiada dość zgrubną dyskretyzację oraz nie uwzględnia wielu zjawisk zachodzących w urządzeniu. Niedokładności ujawniają się zwłaszcza przy wyższych częstotliwościach. Najbardziej prawdopodobną przyczyną tych rozbieżności jest tłumienie pola przez prądy wirowe indukowane w rdzeniu wzbudnika.



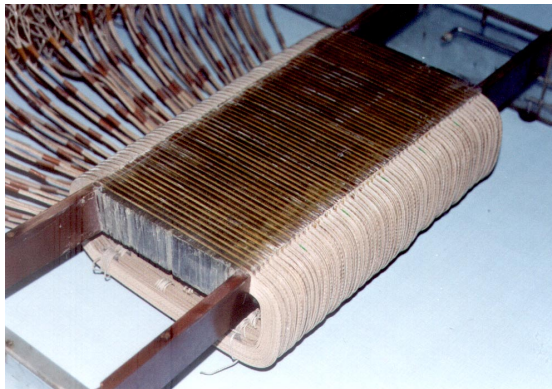


Rys. 16. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych separatora uzyskanych różnymi metodami.

### **BADANIA WERYFIKUJĄCE MODEL MATEMATYCZNY SEPARATORA**

W Instytucie Maszyn Elektrycznych zbudowano model laboratoryjny separatora elektrodynamicznego przedstawiony na fot. 1.

Rdzeń wzbudnika separatora wykonano z pakietu blach elektrotechnicznych o grubości 0,35mm. W rdzeniu wyciętych zostało 60 żłobków o szerokości  $b_Q = 2,5\text{mm}$ . Podziałka żłobkowa wynosi  $t = 5,5\text{ mm}$ . W każdym żłobku umieszczony jest jeden bok cewki składającej się z 18 zwojów nawiniętych przewodem o przekroju prostokątnym (2 x 0,8mm) w izolacji klasy H z oplotu szklanego.

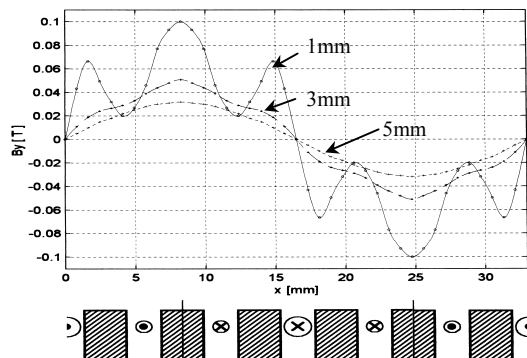


Fot. 1. Widok modelu laboratoryjnego separatora.

### Pomiary indukcji magnetycznej w strefie aktywnej separatora.

Do pomiarów rozkładu indukcji wykorzystano sondę hallotronową o stałej  $c = 25,6 \text{ V/AT}$  przy sterowaniu prądem  $I_s = 10 \text{ mA}$ . Sonda była przemieszczana w kierunku ruchu fali pola magnetycznego w odległości 1, 3 i 5 mm od wierzchołków zębów wzbudnika. Pomiar wartości składowej normalnej do powierzchni strefy aktywnej w funkcji położenia sondy przeprowadzono za pomocą rejestratora x-y typu F-3D. W czasie rejestracji uzwojenia separatora zasilane były prądem stałym o wartościach:  $I_a = 10,6 \text{ A}$ ,  $I_b = 10,6 \text{ A}$ ,  $I_c = 21,2 \text{ A}$ . Odpowiada to wartościom chwilowym prądu w układzie trójfazowym o wartości skutecznej 15 A dla chwili czasowej  $\pi/6$ .

Uzyskane rozkłady indukcji (rys. 17.) wskazują na silną zależność amplitudy i kształtu fali pola od współrzędnej  $y$ . Dopiero w odległości 5 mm od powierzchni wzbudnika można przyjąć, że fala jest sinusoidalna. Poniżej wzrasta gwałtownie amplituda wyższych harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego. Amplituda fali pola magnetycznego szybko maleje w miarę wzrostu odległości od wzbudnika.



Rys. 17. Rozkład składowej normalnej indukcji w przestrzeni aktywnej na tle struktury zębowo-żłobkowej.

### Pomiary siły działającej na przewodzącą cząstkę umieszczoną w strefie aktywnej separatora.

Do pomiaru siły działającej na elementy separowane użyto miniaturowych siłomierzy o zakresach 1 N, 3 i 10 N. Siła przekazywana była za pomocą cienkiej nici nylonowej łączącej cząstkę z siłomierzem. W badaniach elementami separowanymi były prostopadłościenne płytki, o

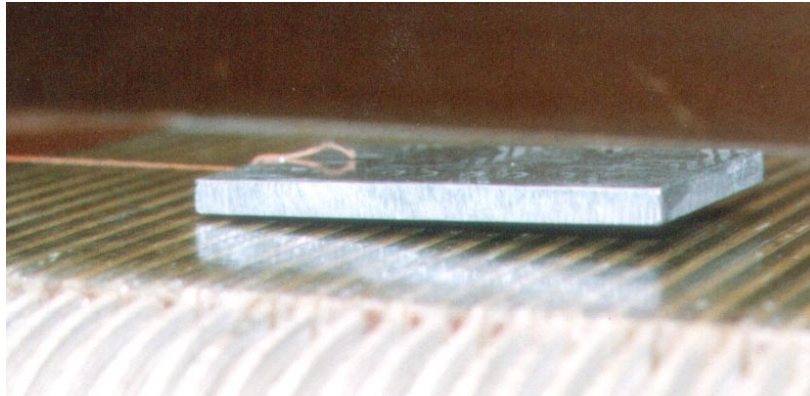


Fot. 2. Widok układu do pomiaru siły.

Zmierzono składową poziomą  $F_x$  siły elektrodynamicznej działającej na nieruchomą, przewodzącą cząstkę. Pomiary wykonano w zależności od:

- prądu zasilania  $I$  przy stałej częstotliwości  $f$  i pozostałych wymiarach cząstki,
- wymiarów cząstki: grubości  $d$ , szerokości  $b$  i długości  $l$ ,
- odległości cząstki od powierzchni strefy aktywnej  $\delta$ ,
- częstotliwości  $f$  zasilania (dla różnych długości cząstki  $l$ ),
- konduktywności cząstki  $\gamma$

Składowa pionowa  $F_y$  była nieznaczna i jej działanie ujawniało się dopiero przy wyższych częstotliwościach. Powyżej 300 Hz obserwowano lewitację cząstek (fot. 3.) wykonanych z aluminium, zatem składowa pionowa była większa od ich ciężaru (od 0,1 do 0,35 N). Na tej podstawie maksymalną gęstość składowej pionowej siły elektrodynamicznej oszacowano na 3 N/cm<sup>3</sup> w strefie aktywnej o wysokości równej 5 mm.



Separatory elektrodynamiczne można zaliczyć do szczególnego rodzaju maszyn indukcyjnych o niekonwencjonalnej budowie. Część wtórna takiej maszyny, którą stanowi zbiór separowanych elementów przewodzących przebywających w danej chwili w strefie aktywnej, jest pozbawiona więzów mechanicznych. Modele matematyczne i metody obliczeń projektowych stosowane do analizy maszyn indukcyjnych można, po odpowiedniej adaptacji, zastosować do projektowania separatorów. Jednakże powinny one uwzględniać specyficzne cechy tego typu urządzeń. Najważniejsze z nich to:

- duże wewnętrzne rozproszenie pola magnetycznego,
- otwarty obwód magnetyczny,
- małe sprzężenie części pierwotnej i wtórnej,
- uzwojenie wzbudnika o najmniejszej liczbie żłobków na biegun i fazę ( $q = 1$ ).

We wstępie rozprawy przedstawiono znaczenie podjętej problematyki dla współczesnego przemysłu. Wskazano na potencjalne korzyści wynikające ze stosowania separatorów elektrodynamicznych. Następnie dokonano przeglądu literatury światowej i rozwiązań patentowych. W tej części autor przedstawił własne rozwiązanie konstrukcji separatora oraz podjął próbę usystematyzowania wielu odmian konstrukcyjnych separatorów. W następnym podrozdziale określono zakres pracy i sformułowano podstawowe tezy.

W rozdziale drugim przedstawiono model matematyczny wybranej konstrukcji separatora elektrodynamicznego, który wykorzystano do analizy pola magnetycznego. Przedstawiona w pracy analiza pola magnetycznego obejmowała cztery etapy. W pierwszym z nich wyznaczono rozkład pola magnetycznego przy użyciu dwuwymiarowego modelu magnetostaticznego separatora.

Na podstawie badania tego prostego modelu wyznaczono parametry wzbudnika, które zapewniają wytworzenie maksymalnego strumienia magnetycznego w strefie aktywnej urządzenia.

W drugim etapie obliczono siły działające na separowaną cząstkę oraz wyznaczono charakterystyki urządzenia używając dwuwymiarowego modelu harmonicznego opierając się na wynikach z etapu pierwszego. W sposób pośredni uwzględniono nieliniowość charakterystyki magnesowania rdzenia separatora obliczając zastępczą przenikalność rdzenia modelu harmonicznego.

W trzecim etapie zbadano wpływ zjawisk brzegowych związanych z ograniczonym wymiarem cząstki w osi  $Z$  na siły działające na cząstkę wykorzystując trójwymiarowy model harmoniczny separatora.

Wyniki obliczeń uzyskane metodą elementów skończonych zweryfikowano badaniami eksperymentalnymi modelu laboratoryjnego separatora w czwartym etapie. Uzyskano jakościową zgodność charakterystyk i parametrów. Modele dwuwymiarowe nie uwzględniają efektów brzegowych wynikających ze skończonej szerokości cząstki. Siły obliczone przy ich pomocy okazały się znacznie zawyżone.

Pomimo niedużej dokładności modele dwuwymiarowe stanowią wystarczające narzędzie do wyznaczania zależności sił separacji od parametrów wzbudnika i cząstek. Duże znaczenie ma w

zoboków na biegunach  $q = \pm 1$ . Należy zaznaczyć, że w konwencjonalnych maszynach indukcyjnych unika się stosowania tak małej wartości liczby  $q$  bowiem intensyfikuje to niekorzystne zjawiska związane z rozkładem pola magnetycznego. W separatorze natomiast jest to dopuszczalne i spowodowane dążeniem do wytwarzania fali indukcji o możliwie małej długości.

3. Zawartość harmonicznych maleje w miarę wzrostu odległości od powierzchni wzbudnika.
4. Pole magnetyczne ma niewielki zasięg w kierunku osi  $Y$ , porównywalny z długością podziałki biegunowej  $\tau$ . Największa indukcja magnetyczna panuje na powierzchni wzbudnika i maleje eksponentalnie ze wzrostem odległości. W związku z tym największe siły działają na cząstki płaskie. Należy dążyć do równomiernego rozmieszczenia cząstek na powierzchni aktywnej w postaci cienkiej warstwy, gdyż oddalenie cząstki od powierzchni wzbudnika powoduje znaczny spadek siły separującej.
5. Siła działająca na cząstkę jest proporcjonalna do jej szerokości i długości. Przy czym długość cząstki  $l$  musi być większa od podziałki biegunowej  $\tau$  urządzenia. Dla elementów, których długość jest mniejsza od połowy długości fali indukcji następuje spadek siły separacji i wzrost siły lewitacji.
6. Istnieje optymalna częstotliwość napięcia zasilania i należy ją dobierać odpowiednio do parametrów separowanej mieszaniny. Separator zatem, powinien być zasilany z przekształtnika częstotliwości o zakresie regulacji od 50 do 500 Hz wyposażonego w układy kompensacji mocy biernej.
7. Separacja cząstek o konduktywności mniejszej niż 20 MS/m jest technicznie nieuzasadniona ze względu na konieczność zastosowania wysokich częstotliwości i związane z tym duże straty mocy w rdzeniu wzbudnika.
8. Efekty brzegowe związane z ograniczonym wymiarem cząstki w osi  $Z$  wywierają znaczny wpływ na osłabienie siły separacji.

**W świetle uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, że wszystkie tezy, postawione na wstępie zostały potwierdzone.**

**Za oryginalne osiągnięcia autor rozprawy uważa:**

- Sformułowanie modeli numerycznych separatora elektrodynamicznego.
- Wyznaczenie charakterystyk i parametrów separatora elektrodynamicznego jako niekonwencjonalnej maszyny indukcyjnej.
- Opracowanie algorytmu automatyzacji zmian parametrów i archiwizacji wyników obliczeń przy wyznaczaniu parametrów i charakterystyk separatora.
- Zaprojektowanie i uruchomienie modelu laboratoryjnego separatora charakteryzującego się poprzecznym ruchem cząstek w stosunku do kierunku propagacji fali pola magnetycznego.

wentylacyjne ze względu na bardzo duże wyzyskanie materiałów czynnych niezbędne do efektywnej separacji. Autor rozprawy uważa, że najefektywniejszym sposobem chłodzenia będą podziobkowe kanały wentylacyjne.

Należy dokonać obliczeń rozkładu pola oraz wyznaczyć siły przy zasilaniu napięciem odkształconym gdyż przewiduje się zasilanie separatora z przetwornika częstotliwości.

Ze względu na duże straty w uzwojeniu wzbudzenia należy rozważyć możliwość zastosowania techniki niskich temperatur w celu zbudowania separatora o nadprzewodzących uzwojeniach. Rozwiązanie takie może okazać się uzasadnione w separatorach, które przetwarzają duże strumienie mieszaniny np.: przy sortowaniu odpadów komunalnych.

W pracy rozpatrywano jedynie separator o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Szybko rozwijające się w ostatnich latach technologie produkcji silnych magnesów trwałych zachęcają do podjęcia prac nad separatorami o wzbudzeniu za pomocą magnesów trwałych.

Godne uwagi wydaje się także przeprowadzenie analizy oddziaływania wędrującego pola magnetycznego na strumień mieszaniny cząstek będących w ruchu.

Urządzenie rozpatrywane w rozprawie nie nadaje się do separacji bardzo małych cząstek. Dalsze prace można rozwinąć w kierunku modelowania polowego zjawisk powstawania sił elektrodynamicznych przy przekraczaniu ostrej granicy pola magnetycznego przez przewodzące cząstki o wymiarach rzędu milimetra.

## WYKAZ PUBLIKACJI Z UDZIAŁEM AUTORA

1. A.I.Curley, K. Bieńkowski: *Cage induction machines with shaft mounted disks*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kazimierz Dolny, 13-17 maja 1994 str.68.
2. G. Kamiński, A. Biernat, K. Bieńkowski: *Composite motion step motor with digital regulator*. Proceedings of West-East Technology Bridge International Conference on Power Electronic and Motion Control, Warsaw, 20-22.09.1994, p.448.

6. K. Bieńkowski: *Badanie rozkładu pola w maszynie prądu stałego w różnych stanach pracy z wykorzystaniem programu PC-OPERA*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 11, Gdańsk 1997. s.41.
7. K. Bieńkowski: *Modelowanie pola magnetycznego silnika indukcyjnego przy użyciu MES*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Zeszyty Naukowe PW Elektryka nr 111, s.255, Warszawa 1999.
8. W. Przyborowski, K. Bieńkowski: *Obliczenia elektromagnetyczne i mechaniczne w strefie żłobkowo-zębowej statora turbogeneratora*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Zeszyty Naukowe PW, Elektryka nr 111, Warszawa 1999. S. 101
9. K. Bieńkowski: *Model polowy silnika indukcyjnego*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 13, Gdańsk 1999.
10. Kamiński G., Bieńkowski K.: *Electrodynamic separator with bottom slot cooling system*. Archives of Electrical Engineering. Vol. XLVIII no 190 – 4/1999
11. Bieńkowski K., Kamiński G., : *Badania modelu separatora elektrodynamicznego*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, z. 117, Warszawa, 2001.
12. Kamiński G., Wrotek H., Obara P., Bieńkowski K.: *Przełączalny silnik reluktancyjny z toczącym się wirnikiem*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, z. 117, Warszawa, 2001.
13. Bieńkowski K., Szczypior J. *Influence of constructional parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque*. Berichte und Informationen HTW, Dresden (w druku)