

Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjnych młyna elektromagnetycznego na jego właściwości eksploatacyjne

Streszczenie. Przeanalizowano wpływ parametrów konstrukcyjnych (liczby zwojów cewek elektromagnesów, grubość i konduktywność osłony komory roboczej) młyna elektromagnetycznego na takie wielkości eksploatacyjne jak indukcja magnetyczna w komorze roboczej, pobierany prąd, straty na prądy wirowe, współczynnik mocy, zastępcza impedancja fazowa. Stwierdzono, że liczba zwojów cewek ma duże znaczenie, przy czym im większa liczba zwojów, tym mniejsze pole w komorze roboczej.

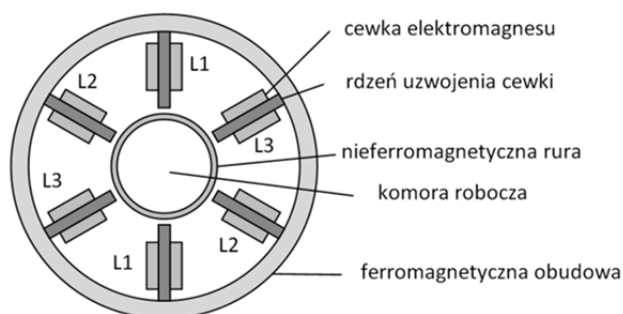
Abstract. The influence of design parameters (the number of turns of electromagnet coils, the thickness and conductivity of the working chamber enclosure) of the electromagnetic mill on such operational quantities as magnetic induction in the working chamber, current, losses due to eddy currents, power factor, equivalent phase impedance were analyzed. It was found that the number of turns of the coils is of great importance, with the larger the number of turns, the smaller the area in the working chamber. (Influence of selected construction parameters of electromagnetic mill on its operational properties).

Słowa kluczowe: młyn elektromagnetyczny, MES, obliczenia elektromagnetyczne.

Keywords: electromagnetic mill, FEM, electromagnetic calculations.

Wstęp

Urządzenia do mielenia są powszechnie stosowane w celu uzyskania rozdrobnienia materiałów do pożądanych frakcji. Jednym z takich urządzeń jest młyn elektromagnetyczny (EM), który stosuje się do mielenia różnego rodzaju materiałów sypkich [1, 2], np. do mielenia i suszenia węgla [3], aktywowania popiołu lotnego [4-7] czy półproduktów miedziowych [8]. W odróżnieniu od młyna mechanicznego, w którym element rozdrabniający nadawę jest napędzany mechanicznie, w młynie EM wirujące pole magnetyczne napędza drobne mielniki w postaci małych ferromagnetycznych pręcików rozproszonych chaotycznie w całej komorze roboczej i niemających nigdzie fizycznego umocowania. Wirujące pole magnetyczne można łatwo uzyskać, stosując zasilanie trójfazowe. Jest ono wykorzystywane także w silnikach elektrycznych czy mieszadłach elektromagnetycznych. Schematyczny widok konstrukcji młyna EM pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Idea konstrukcji młyna elektromagnetycznego

Rozdrabniany materiał wraz z mielnikami umieszczony jest w nieferromagnetycznej rurze. W typowych konstrukcjach młyna przy zasilaniu 50 Hz mielniki wirują z prędkością 3000 obrotów na minutę. Jest to jednak stan wyidealizowany – w rzeczywistości wskutek zderzeń mielników ze sobą, rozdrabnianym materiałem i ścianami komory roboczej prędkość ta jest mniejsza. Zderzenia te powodują dość silne nagrzewanie się młyna. Nagrzewanie pochodzi także od prądów wirowych w elementach konstrukcyjnych oraz od prądów płynących w uzwojeniach wzbudnika. Ponieważ efektywność mielenia zależy od

energii uzyskiwanej przez mielniki, a ta z kolei jest funkcją kwadratu indukcji magnetycznej, w obszarze komory roboczej wymagane są duże wartości indukcji. Pociąga to za sobą duże wartości prądów, co jest następną składową strat ciepłych, tym razem w uzwojeniach wzbudnika. Dodatkowo młyn taki charakteryzuje się małym współczynnikiem mocy, co można jednak wyeliminować stosując kompensację mocy biernej. Inną wadą młyna elektromagnetycznego jest powstawianie dużych wibracji elementów konstrukcyjnych, zwłaszcza w słabo spakietowanych rdzeniach oraz źle zaprojektowanych konstrukcjach. Pomimo tego w porównaniu z tradycyjnym młynem kulowym młyn elektromagnetyczny o porównywalnej wydajności zużywa około 10 razy mniej energii, emituje mniejszy hałas, umożliwia mielenie do drobniejszej frakcji uziarnienia, jest znacznie mniejszy [3]. Dlatego dopracowanie konstrukcji młyna EM jest celowe [1,2, 9-12].

Na proces mielenia mają wpływ rozmiary geometryczne elementów konstrukcyjnych (np. odległości między biegunami), wartość pola magnetycznego w komorze roboczej, a także rozmiary i kształt mielników. W zależności od właściwości mechanicznych nadawy (kruchość, twardość) oraz od wymaganego stopnia jej rozdrobnienia istotny jest czas działania młyna na rozdrabniany materiał, który może być podawany w sposób ciągły lub też porcjami.

W pracy zbadano wpływ różnych parametrów konstrukcyjnych (ilości zwojów na cewkę, grubości i konduktywności obudowy komory roboczej itp.) na wielkości eksploatacyjne (prąd, straty mocy, współczynnik mocy, impedancję fazową, indukcję w komorze roboczej) przykładowej konstrukcji młyna. Celem pracy było uzyskanie informacji o wpływie różnych parametrów na pracę młyna.

Metodologia

Z powodów konstrukcyjnych wygodniej jest wykonać obudowę w postaci sześciokąta foremnego aniżeli w postaci walca. Taką konstrukcję zastosowano m.in. w młynie firmy ELTRAF [13]. Przekrój poprzeczny takiego młyna, odwzorowany w programie FEMM [14], pokazano na rysunku 2. Przyjęto następujące wartości parametrów wymiarowych:

- głębokość części roboczej (cewek i komory roboczej) wynosiła 200 mm,

- zewnętrzny promień komory roboczej: 110 mm,
- grubość jarzma: 60 mm,
- długość rdzenia cewki: 250 mm,
- szerokość rdzenia cewki: 60 mm,
- grubość obudowy komory roboczej: 3 mm oraz w zakresie od 1 do 5 mm.

Parametry materiałowe:

- jarzmo i rdzenie cewek: wykonane z blachy elektrotechnicznej M-36 pakietowanej (blacha magnetyczna z biblioteki programu FEMM),
- komora robocza: nieferromagnetyk o konduktywności 1 MS/m oraz w zakresie od 0,1 do 5 MS/m,
- cewki: drut nawojowy miedziany w liczbie zwojów 70 oraz w zakresie od 40 do 100.

Parametry zasilania:

- zasilanie trójfazowe 230 V (gwiazda),
- częstotliwość: 50 Hz,
- brak wyższych harmonicznych.

Wyznaczono następujących wielkości eksploatacyjne:

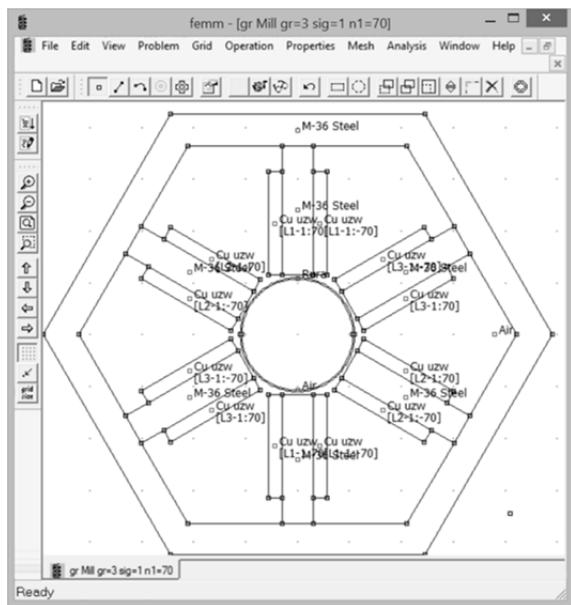
- indukcję maksymalną w komorze roboczej,
- prąd fazowy,
- pobór mocy czynnej,
- współczynnik mocy,
- zastępczą rezystancję i reaktancję fazy.

Poszczególne obliczenia wykonywano przy stałych wartościach parametrów konstrukcyjnych i zasileniowych podanych wyżej. Jako zmienne niezależne przyjęto:

- liczbę zwojów cewek: od 40 do 100,
- grubość obudowy komory roboczej: od 1 do 5 mm,
- konduktywność obudowy komory: od 0,1 do 5 MS/m.

Przyjęto następujące założenia obliczeniowe:

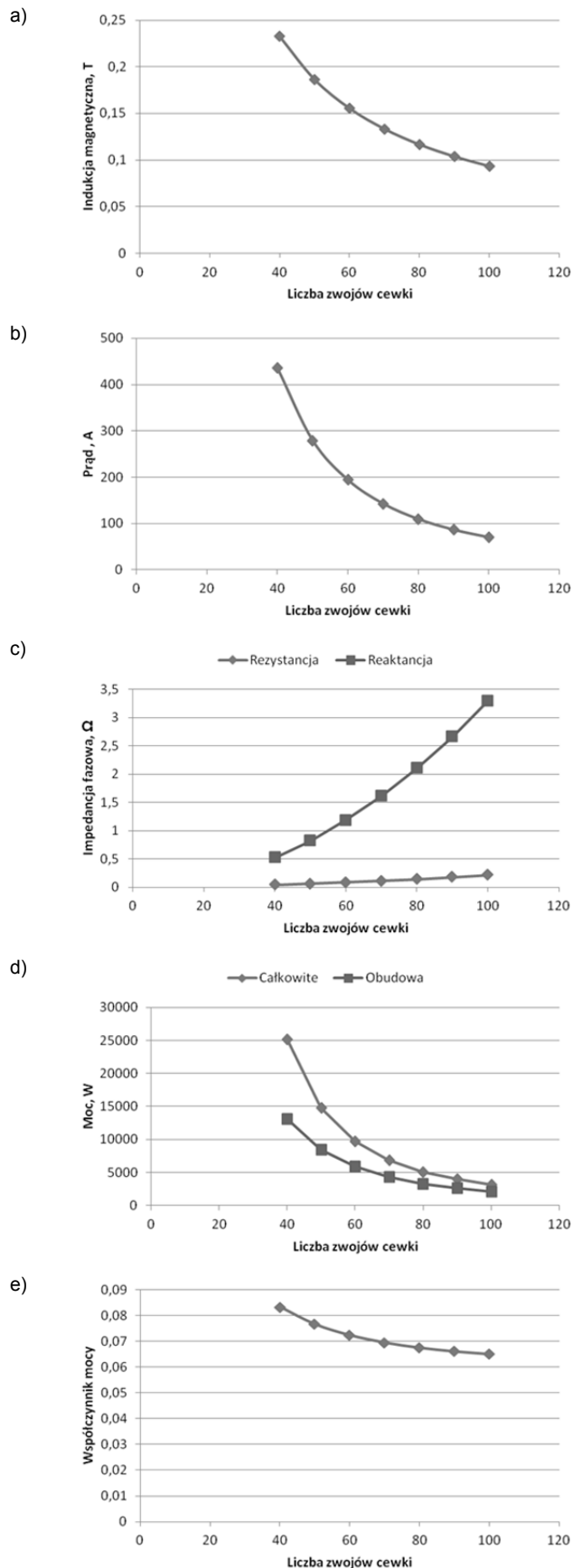
- zastosowano program FEMM 4.2 (obliczenia metodą elementów skończonych); do celów pracy napisano skrypt LUA umożliwiający automatyzację obliczeń;
- obliczenia wykonano w przekroju poprzecznym młyna.



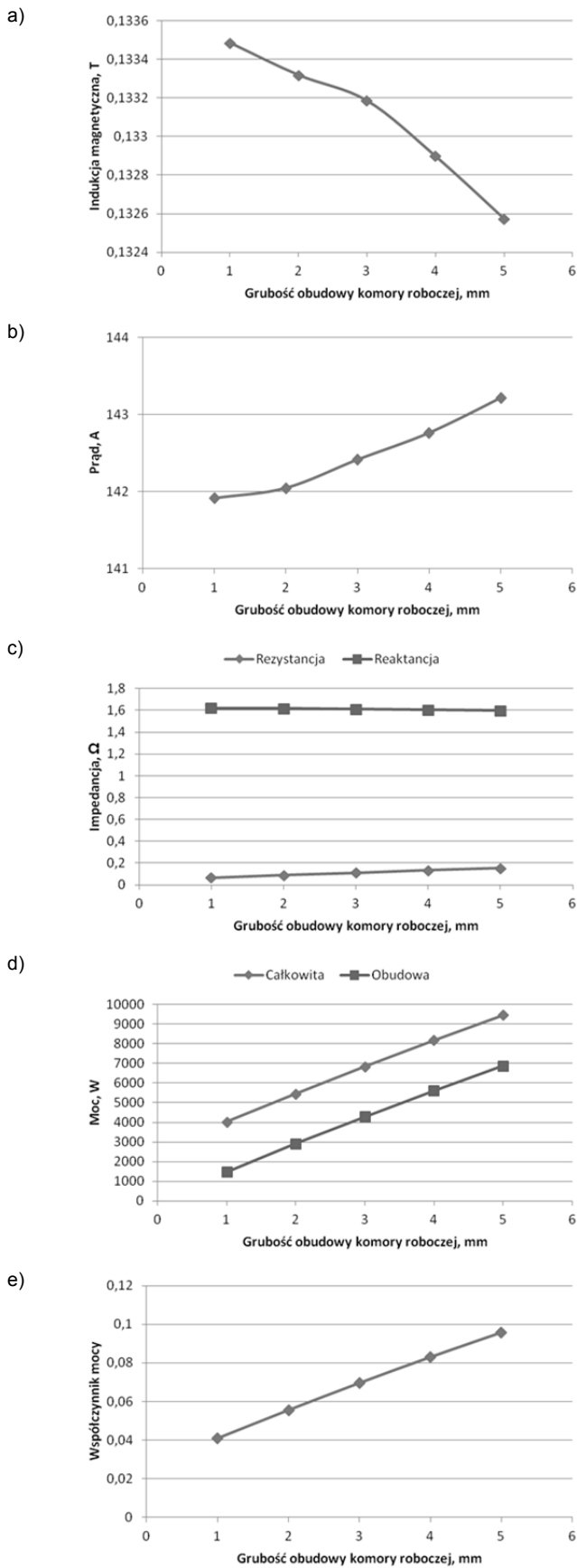
Rys. 2. Odwzorowanie konstrukcji młyna elektromagnetycznego w programie FEMM

Wpływ liczby zwojów

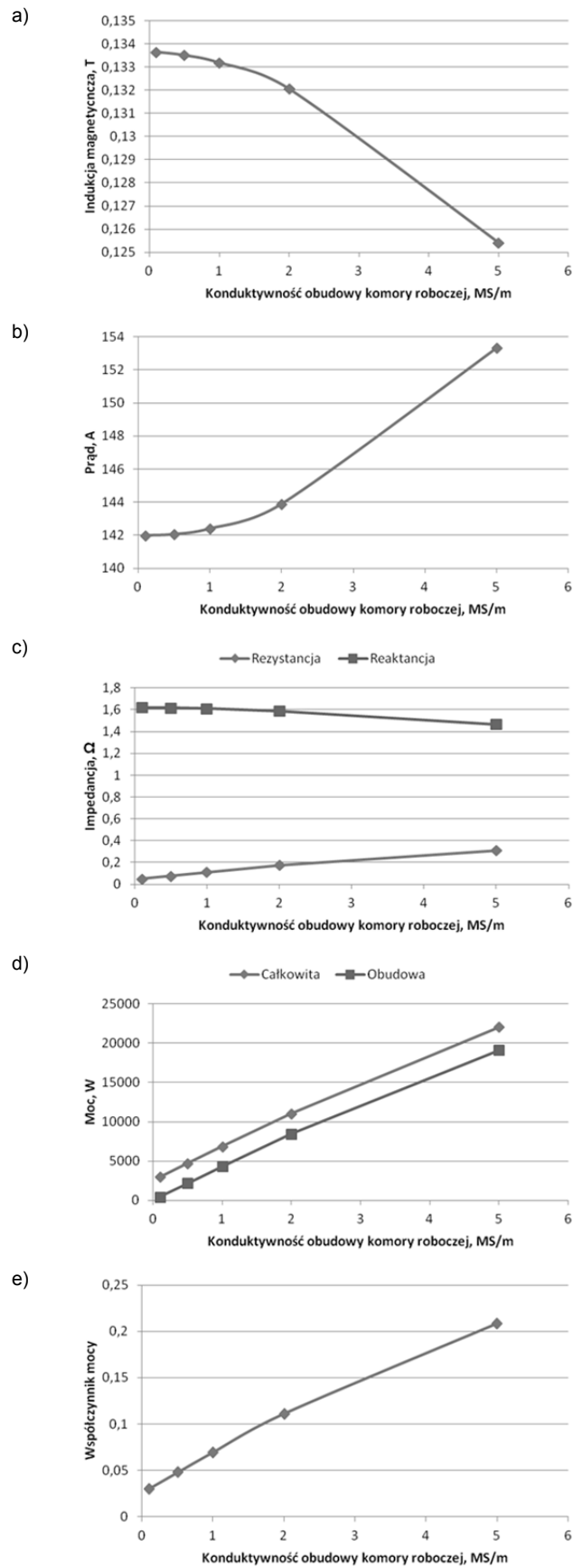
Na rysunku 3 pokazano wpływ liczby zwojów cewek elektromagnesów na rozpatrywane wielkości eksploatacyjne. Dość nieoczekiwanie wartość indukcji w komorze roboczej maleje wraz ze wzrostem liczby zwojów (rys. 3a). Wynika to z tego, że wzrost liczby zwojów powoduje także znaczny wzrost indukcyjności (rys. 3c), co przy zasilaniu napięciowym przekłada się na spadek prądu (rys. 3b) i w efekcie spadek wartości pola magnetycznego.



Rys. 3. Wpływ liczby zwojów na wielkości eksploatacyjne młyna elektromagnetycznego: a) na indukcję magnetyczną w komorze roboczej; b) na prąd fazowy; c) na wypadkową rezystancję i reaktancję jednej fazy; d) na straty mocy; e) na współczynnik mocy



Rys. 4. Wpływ grubości osłony komory roboczej na wielkości eksploatacyjne młyna elektromagnetycznego: a) na indukcję magnetyczną w komorze roboczej; b) na prąd fazowy; c) na wypadkową rezystancję i reaktancję jednej fazy; d) na straty mocy; e) na współczynnik mocy



Rys. 5. Wpływ konduktywności osłony komory roboczej na wielkości eksploatacyjne młyna elektromagnetycznego: a) na indukcję magnetyczną w komorze roboczej; b) na prąd fazowy; c) na wypadkową rezystancję i reaktancję jednej fazy; d) na straty mocy; e) na współczynnik mocy

Wraz ze wzrostem liczby zwojów zmniejszają się straty energii w osłonie komory roboczej (od prądów wirowych) oraz całkowite straty mocy (w pozostałych elementach konstrukcyjnych oraz w uzwojeniach - rys. 3d). Współczynnik mocy (rys. 3e) przyjmuje bardzo małe wartości (rzędu 0,1), więc konieczna jest poprawa współczynnika mocy. W rzeczywistości współczynnik mocy będzie nieco większy, gdyż obliczenia dotyczą stanu jałowego (brak mielników i nadawy w komorze roboczej).

Aby uzyskać duże pole magnetyczne w komorze roboczej konieczny jest odpowiednio duży okład prądowy. W warunkach wymuszenia prądowego wystarczyłoby zwiększyć liczbę zwojów, jednak w warunkach wymuszenia napięciowego taki zabieg nie jest skuteczny, gdyż powoduje duży wzrost reakcji, co przekłada się na zmniejszenie prądu. Pomimo wzrostu liczby zwojów całkowity okład prądowy zmniejsza się, co w efekcie końcowym zmniejsza wartość indukcji magnetycznej w komorze roboczej. Teoretycznie może się wydawać, że korzystne jest zastosowanie cewek o małej liczbie zwojów, jednak należy wziąć pod uwagę, że mogłoby to spowodować przepływ zbyt dużego prądu. Istnieje więc pewna liczba optymalna liczba zwojów, która zapewnia niezbyt duży prąd i odpowiednio dużą indukcję w komorze roboczej.

Wpływ grubości obudowy komory roboczej

Na rysunku 4 pokazano wpływ grubości komory roboczej na wielkości eksploatacyjne. W rozpatrywanym zakresie grubość ściany komory roboczej ma niewielki wpływ na indukcję w komorze roboczej oraz na prąd i impedancję (rys. 4a-c). Wyraźnie za to rosną straty energii w osłonie (rys. 4d), co jednak nie przekłada się na istotny wzrost prądu, gdyż rośnie współczynnik mocy (rys. 4e). Z powyższego wynika, że osłona powinna mieć jak najcieńsze ściany, aby prądy wirowe w niej zaindukowane nie powodowały nadmiernych strat.

Wpływ konduktywności obudowy komory roboczej

Na rysunku 5 pokazano wpływ konduktywności komory roboczej na wielkości eksploatacyjne. Im większa konduktywność, tym mniejsza wartość indukcji w komorze roboczej (rys. 5a) i tym większy prąd (rys. 5b), chociaż zmiany nie są duże, co wynika ze stosunkowo małej zmiany w reakcji fazy (rys. 5c). Duże większe zmiany są widoczne w energii traconej w osłonie (rys. 5d) oraz we współczynniku mocy (rys. 5e), które istotnie rosną. Konduktywność osłony powinna być mała, aby zredukować w niej prądy wirowe i związane z nimi straty energii.

Wnioski

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

- bardzo istotnym parametrem konstrukcyjnym jest liczba zwojów cewek elektromagnesu – wbrew naiwnym oczekiwaniom wzrost liczby zwojów powoduje spadek wartości pola magnetycznego w komorze roboczej;
- współczynnik mocy jest bardzo mały, co wymusza stosowanie kompensacji mocy biernej;
- z energetycznego punktu widzenia osłona komory roboczej powinna być nieprzewodząca lub przynajmniej jak najcieńsza, aby zredukować straty energii spowodowane przepływem zaindukowanych w niej prądów wirowych.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Jabłoński prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: p.jablonski@el.pcz.czest.pl; dr inż. Tomasz Drózdź, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: tomasz.drozd@urk.edu.pl; dr inż. Maciej Gliniak, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: maciej.gliniak@urk.edu.pl; dr inż. Karolina Trzyniec, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: karolina.trzyniec@urk.edu.pl; mgr inż. Anna Lis, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: anna.lis@urk.edu.pl; dr hab. inż. Paweł Kiełbasa prof. UR, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: pawel.kielbasa@urk.edu.pl; dr inż. Mateusz Malinowski, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków, E-mail: mateusz.malinowski@urk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Wołosiewicz-Głąb M., Ogonowski Sz., Foszcz D., Construction of the electromagnetic mill with grinding system, classification of crushed minerals and the control system, *IFAC PapersOnLine*, 49-20 (2016), 067–071, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.098.
- [2] Wołosiewicz-Głąb M., Ogonowski Sz., Foszcz D., Design of the electromagnetic mill and the air stream ratio model, *IFAC PapersOnLine*, 50-1 (2017) 14964–14969, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2554.
- [3] Sławiński K., Knaś K., Gandor M., Balt B., Nowak W., Młyn elektromagnetyczny i jego zastosowanie do mielenia i suszenia węgla, *Piece przemysłowe & kotły*, I-II (2014) 21-25.
- [4] Sosiński R., Szymanek P., Nowak W., Aspects of use of the electromagnetic mill for activating the fly ash, *XIII International Conference „Ashes from Energetics”*, Kraków, 6-8 November 2006, 175-187.
- [5] Sosiński R., Szczypiorowski A., Szymanek P., Nowak W., Problems concerning the electromagnetic mill using, *XIV International Conference „Ashes from Energetics”*, Międzyzdroje, 17-19 October 2007, 95-105.
- [6] Sosiński R., Szczypiorowski A., Szymanek P., Nowak W., Aspekty wykorzystania młyna elektromagnetycznego w rozwoju węglowej technologii energetycznych, *24-Międzynarodowa Konferencja „Węgiel”*, Pittsburgh 2007.
- [7] Sosiński R., Nowak W., Szymańska J., Problematyka stosowania młynów elektromagnetycznych w wysokowydajnych procesach zagospodarowania popiołów lotnych, *Międzynarodowa Konferencja EuroCoalAsh*, Warszawa 6-8.10 2008.
- [8] Szczepaniak K., Skorupska B., Kubacz N., Research into regrinding process of copper middlings in the electromagnetic mill. *Cuprum Ore Mining Scientific and Technical Magazine*, No. 2 (2015), 47-53.
- [9] Sosiński R., Opracowanie metodyki projektowania trójfazowych wzbudników z biegunami jawnymi pola wirującego do młynów elektromagnetycznych, *rozprawa doktorska*, Politechnika Częstochowska, 2007.
- [10] Styła S., A new grinding technology using an electromagnetic mill - testing the efficiency of the process, *Econtechmod. An Int. Quarterly J.*, 6 (2017), 1, 81-88.
- [11] Styła S., Mańko M., Młyn elektromagnetyczny wykorzystujący w roli trójfazowego wzbudnika pola wirującego stojan silnika indukcyjnego, *XXIX Sympozjum PTZE*, Janów Podlaski, 9-12 czerwca 2019.
- [12] Styła S., Laboratory studies of an electromagnetic mill inductor with a power source, *Econtechmod. An Int. Quarterly J.*, 6 (2017), 2, 109-114.
- [13] ELTRAF, Instrukcja obsługi wzbudnika magnetycznego typu WZB.MAG.Ø200, Materiały formy ELTRAF.
- [14] Meeker D.C., Finite Element Method Magnetics, version 4.2 (21Apr2019), <http://www.femm.info>.