

Franciszek FIKUS, Romuald KADZIMIERZ
Tadeusz WIDERA

UPROSZCZONA ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO
W DOZOWNIKU ELEKTRODYNAMICZNYM

Streszczenie. Analiza pola magnetycznego w dozowniku elektrodynamicznym do ciekłego metalu. Do obliczenia pola magnetycznego układów prądu przemiennego ograniczonych żelazem wykorzystano teorię stałego pola magnetycznego ograniczonego żelazem. Przykład obliczenia dla dozownika elektrodynamicznego do ciekłego metalu.

1. Wstęp

Czynnikiem mającym duży wpływ na jakość odlewów oraz automatyzację procesów w nowoczesnej odlewni jest dozowanie ciekłego metalu o ściśle określonej ilości i temperaturze. Stosowane obecnie tzw. dozowanie mechaniczne [1], polegające na wlewaniu metalu do form odlewniczych z przechyłanego pojemnika, jest mało wydajne i uciążliwe, stwarza znaczne zagrożenie warunków bezpieczeństwa pracy.

W świecie prowadzone są intensywne badania nad opracowaniem innych metod dawkowania ciekłego metalu, które byłyby pozbawione wad, jakie posiada dozowanie mechaniczne. Jednym ze sposobów wymuszenia wypływu płynnego metalu jest wykorzystanie zjawiska występowania sił działających na ciecz elektrycznie przewodzącą, umieszczoną w polu elektromagnetycznym.

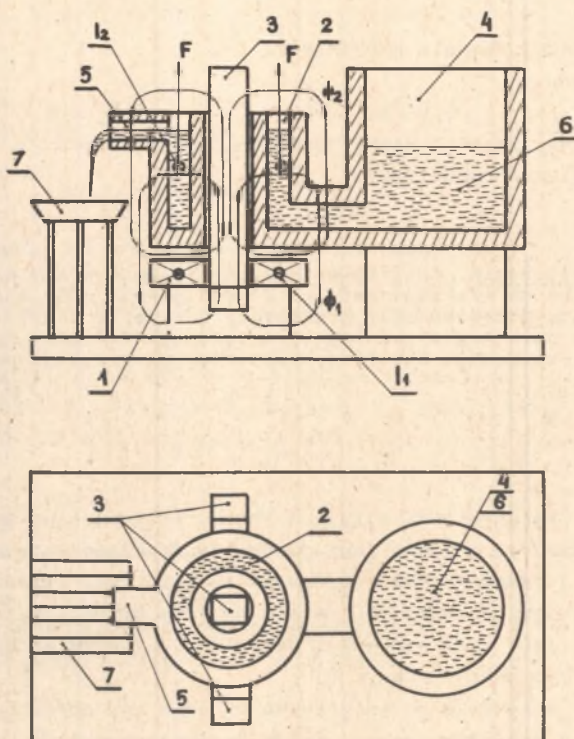
W Instytucie Metalurgii Politechniki Śląskiej opracowano, opatentowano i zbudowano urządzenie dozujące ciekły metal pod nazwą "dozownik elektrodynamiczny". Prototyp poddaje się aktualnie próbom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowych. Celem doskonalenia urządzenia potrzebna jest znajomość rozkładu pola magnetycznego, którego ścisła analiza jest bardzo skomplikowana i w praktyce inżynierskiej mało przydatna. Duże zastosowanie natomiast mogą mieć metody uproszczone.

W artykule przedstawiono zastosowanie jednej z nich do obliczenia pola magnetycznego w dozowniku elektrodynamicznym.

2. Budowa i działanie dozownika

Na schemacie dozownika elektrodynamicznego (rys. 1) uzwojenie wzbudnika 1 zasilane prądem przemiennym umieszczone jest na środkowej kolumnie rdzenia magnetycznego 3. Nad wzbudnikiem znajduje się koncentryczny kanał

roboczy 2, połączony ze zbiornikiem ciekłego metalu 4. W górnej części kanał zakończony jest lejem wylewowym 5.



Rys. 1. Schemat dozownika elektrodynamicznego

1 - wzbudnik, 2 - kanał roboczy, 3 - rdzeń magnetyczny, 4 - zbiornik na ciekły metal, 5 - lej wylewowy, 6 - ciekły metal, 7 - forma, I_1 - prąd wzbudnika, I_2 - prąd indukowany w ciekłym metalu, ϕ_1 - strumień magnetyczny związany z prądem wzbudnika, ϕ_2 - strumień magnetyczny związany z prądem indukowanym w ciekłym metalu, F - siła działająca na ciekły metal w kanale roboczym

Napięcie przemiennie przyłożone do uzwojenia wzbudnika powoduje przepływ prądu I_1 . Prąd I_1 wytwarza strumień magnetyczny ϕ_1 zamykający się przez rdzeń, ciekły metal w kanale roboczym, zwany dalej wsadem oraz powietrze.

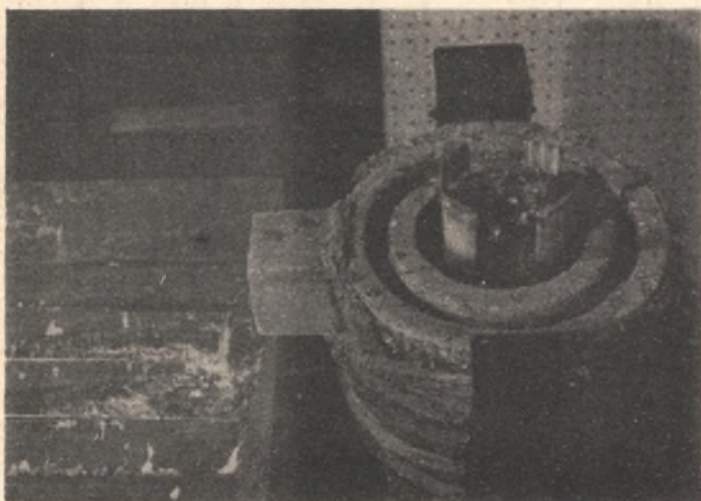
Przemienny strumień ϕ_1 indukuje we wsadzie prąd I_2 o gęstości J_2 . Z prądem tym związany jest strumień ϕ_2 . Superpozycja pól magnetycznych pochodzących od prądów wzbudnika i wsadu daje wypadkowe pole magnetyczne o indukcji B_w (strumień pola wypadkowego ϕ_w na rys. 1 nie jest zaznaczony).

Wzajemne oddziaływanie prądu I_2 i pola magnetycznego o indukcji B_w powoduje powstanie sił działających na cząsteczki ciekłego metalu. Siłę od-

działania pola na element objętości wsadu dV , w którym występuje gęstość prądu J_2 , można wyznaczyć z równania

$$d\vec{F} = (J_2 \times \vec{B}_w) dV. \quad (1)$$

Wektory \vec{B}_w i J_2 są funkcjami czasu oraz położenia w przestrzeni zajmowanej przez ciekły metal w kanale roboczym. Prąd I_2 oraz składowa poprzeczna indukcji magnetycznej, oznaczona przez B_{pw} , wywołują siłę F , podnoszącą metal w kanale roboczym. Z chwilą, gdy poziom jego znajdzie się powyżej dolnej krawędzi leja wylwowego, metal zaczyna grawitacyjnie wypływać na zewnątrz. Z teorii oraz praktyki pomiarowej wiadomo, że przestrzenny rozkład indukcji magnetycznej oraz gęstość prądu we wsadzie nie jest równomierny.



Rys. 2. Laboratoryjny dozownik elektrodynamiczny w czasie dawkowania

Z przeprowadzonych pomiarów [2] wynika, że składowa B_{pw} jak i J_2 osiągają największe wartości w dolnej części wsadu, malejąc szybko wzdłuż jego wysokości. W związku z tym również i siły działające na cząsteczki ciekłego metalu są największe u dna wsadu.

Celem otrzymania bardziej równomiernego rozkładu sił wzdłuż wysokości wsadu należy za pomocą dodatkowych uzwojeń wytworzyć pomocnicze prądy we wsadzie oraz pomocnicze pole poprzeczne.

Nie jest znana metoda, która pozwalałaby określić parametry i miejsce usytuowania tych uzwojeń. Obliczenie rozkładu pola magnetycznego dla przypadku najprostszego (rys. 1) może być podstawą do przewidywania wpływu uzwojeń dodatkowych na kształt pola w dozowniku oraz przebieg gęstości prądu we wsadzie.

3. Analiza pola magnetycznego w dozowniku

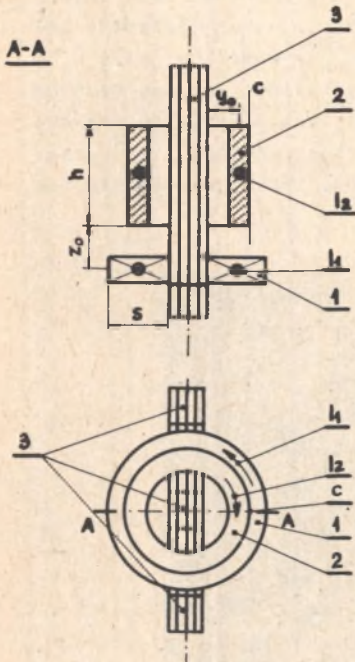
3.1. Metoda obliczania pola magnetycznego w dozowniku.

Założenia upraszczające

Przedstawiony na rys. 1 schemat dozownika zastąpiono układem wsad-wzbudnik (rys. 3). Obliczenie rozkładu pola magnetycznego tego układu przeprowa-

dzone zostanie przy użyciu metody uproszczonej. Polega ona na wykorzystaniu, w analizie pola magnetycznego układów prądu przemiennego ograniczonych żelazem, teorii stałego pola magnetycznego [3]. Obecność stali uwzględnia się przez wprowadzenie tzw. odbicia zwierciadlanego prądu w jej powierzchni. Uproszczenie to jest możliwe wszędzie tam, gdzie efekt wysokiej przenikalności magnetycznej żelaza znacznie przewyższa efekt reakcji prądów wirowych, indukowanych w odbijającej powierzchni stali przez pole przemiennie.

Gdy prąd przemienny przepływa w pobliżu rdzenia magnetycznego zblachowanego w ten sposób, że nie mogą w nim swobodnie powstawać prądy wirowe, pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd ma podobny obraz jak pole wytworzone przez prąd stały przepływający w pobliżu powierzchni żelaza. Inny kształt natomiast przyjmuje pole w przypadku przewodu wiodącego prąd przemienny, umieszczonego w pobliżu masywnej powierzchni metalowej lub rdzenia zblachowanego równoległe do toru przepływu prądu. W tym układzie obraz pola zależy zarówno od przewodności właściwej metalu, w pobliżu którego przepływa prąd jak i częstotliwości prądu.



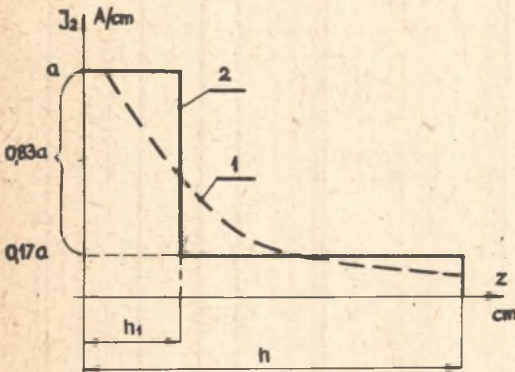
Rys. 3. Uproszczony schemat dozownika

1 - wzbudnik, 2 - wsad, 3 - rdzeń magnetyczny, h - wysokość wsadu, s - szerokość wzbudnika, c - prosta, wzdłuż której obliczono rozkład składowej poprzecznej indukcji magnetycznej

Indukcja magnetyczna na powierzchni masywnej płyty stalowej przy częstotliwości 50 Hz jest nieco mniejsza niż przy pełnym jednoimiennym odbiciu, jak gdyby prąd odbity stanowił 0,7-0,8 prądu rzeczywistego [3]. Tak więc przy prądzie przemiennym pole magnetyczne w pobliżu masywnej powierzchni stalowej można w przybliżeniu wyznaczyć, tak jak przy prądzie stałym, zmniejszając nieco prąd odbity.

Celem dalszego ułatwienia analizy pola magnetycznego układu wsad-wzbudnik (rys. 3) przyjęto następujące uproszczenia:

- składowa poprzeczna indukcji magnetycznej obliczona zostanie w punktach leżących na prostej c , poprowadzonej wzdłuż zewnętrznej powierzchni wsadu (rys. 3). Obecność rdzenia magnetycznego uwzględniona zostanie przez wprowadzenie odbicia zwierciadlanego prądu wsadu i wzbudnika jedynie od środkowej kolumny tego rdzenia,
- przenikalność magnetyczną rdzenia przyjęto równą nieskończoności, wobec czego prąd odbity będzie równy prądowi rzeczywistemu,

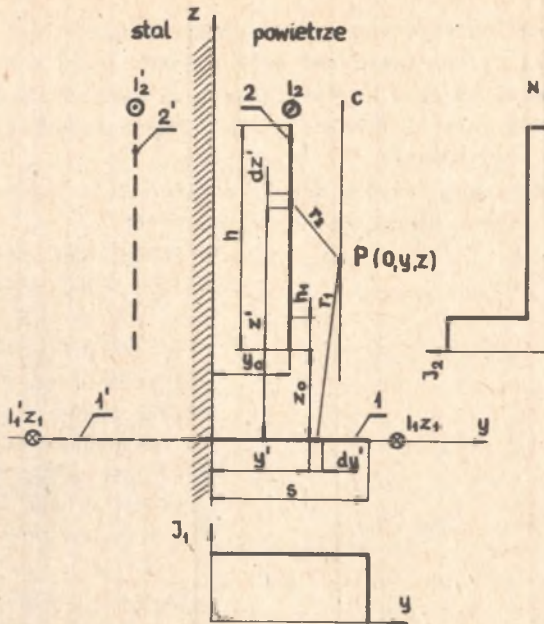


Rys. 4. Rozkład gęstości prądu wsadu
 1 - krzywa otrzymana z pomiarów, 2 - rozkład przyjęty do obliczeń, 0,17a - wartość gęstości prądu rozłożonego równomiernie na całej wysokości wsadu h , 0,83a - wartość gęstości prądu rozłożonego równomiernie na odcinku h_1 wysokości wsadu

- przebieg gęstości prądu J_2 wzdłuż wysokości wsadu założono jak na rys. 4 (linią przerywaną na tym rysunku zaznaczono przebieg $J_2 = f(h)$ zdjęty pomiarowo). Analiza pola magnetycznego przy przyjęciu pomierzonego rozkładu gęstości prądu we wsadzie [2] prowadziłaby do obliczania skomplikowanych całek. Dla wzbudnika natomiast przyjęto równomierny rozkład gęstości prądu wzdłuż całej szerokości,
- cylindryczny wsad zastąpiono prostoliniowym odcinkiem nieskończenie cienkiej szyny o wysokości równej wysokości wsadu h [3], [4]. Szyna modelująca wsad przewodzi prąd o rozkładzie gęstości J_2 jak na rys. 4,

- koncentryczne uzwojenie wzbudnika zastąpione zostało prostoliniowym odcinkiem nieskończenie cienkiej szyny, której szerokość równa jest szerokości wzbudnika s . Przez szynę tę przepływa prąd o równomiernym rozkładzie gęstości $J_1 = \frac{I_1 z_1}{s}$,
- analiza rozkładu składowej poprzecznej indukcji magnetycznej przeprowadzona zostanie dla płaskiego układu wsad-wzbudnik. Otrzymane wyniki będą słuszne dla układu walcowego o dostatecznie dużym promieniu krzywizny.

Przyjmując wyżej wymienione założenia dochodzi się do modelu obliczeniowego układu wsad-wzbudnik przedstawionego na rys. 5.



Rys. 5. Model obliczeniowy dozownika

1 - szyna modelująca wzbudnik, 1' - odbicie zwierciadlane wzbudnika, 2 - szyna modelująca wsad, 2' - odbicie zwierciadlane wsadu, oś x - prostopadła do płaszczyzny rysunku

3.2. Potencjał wektorowy oraz składowe indukcji magnetycznej dla modelu obliczeniowego

Pola magnetycznego będzie się poszukiwać za pośrednictwem potencjału wektorowego \vec{A} związanego z natężeniem pola \vec{H} zależnością:

$$\text{rot } \vec{A} = \mu \vec{H} = \vec{B}. \quad (2)$$

W układzie współrzędnych prostokątnych

$$\text{rot } \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (3)$$

Jeżeli tor strugi prądowej jest równoległy do osi x to:

$$A_z = A_y = 0; \quad \vec{A} = A_x(y, z) \vec{i}, \quad (4)$$

czyli

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{\partial A}{\partial z} \vec{j} - \frac{\partial A}{\partial y} \vec{k}, \quad (5)$$

gdzie dla uproszczenia zapisu przyjęto:

$$A_x(y, z) = A$$

Na podstawie (2) i (5) składowe indukcji magnetycznej mają postać:

$$B_x = 0; \quad B_y = \frac{\partial A}{\partial z}; \quad B_z = -\frac{\partial A}{\partial y} \quad (6)$$

Przyjmując oznaczenia jak na rys. 5, potencjał wektorowy A'_u wzbudnika wyraża się zależnością [5], [6]:

$$\begin{aligned} A'_u &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \int_0^s \ln r_1 dy' = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \int_0^s \ln [(y' - y)^2 + z^2] dy' \end{aligned} \quad (7)$$

Po rozwiązaniu (7), wyrażenie na potencjał wektorowy przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} A'_u &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \left\{ (s-y) \ln [(s-y)^2 + z^2] + y \ln (y^2 + z^2) + \right. \\ &\quad \left. + 2z \left[\operatorname{arctg} \frac{s-y}{z} + \operatorname{arctg} \frac{y}{z} \right] - 2s \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Z uwagi na (6) i (8) składowe indukcji magnetycznej B'_u są równe:

$$B'_{xu} = 0 \quad (9)$$

$$B'_{yu} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} 2 \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{s-y}{z} + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y}{z} \right] \quad (10)$$

$$B'_{zu} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \ln \frac{(s-y)^2 + z^2}{y^2 + z^2} \quad (11)$$

Dla odbicia zwierciadlanego prądu wzbudnika w rdzeniu magnetycznym potencjał wektorowy A''_u oraz składowe indukcji magnetycznej B''_u wyrażają się zależnościami:

x) Indeks u będzie się oznaczać wielkości związane ze wzbudnikiem, natomiast indeksem m związane ze wsadem. Znak prim dotyczy wielkości związanych z prądami I_1 oraz I_2 , zaś znak bis związanych z odbiciem zwierciadlanym tych prądów.

$$A''_u = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I'_1 z_1}{s} \left\{ (s+y) \ln \left[(s+y)^2 + z^2 \right] - y \ln (y^2 + z^2) + \right. \\ \left. + 2z \left[\arctg \frac{s+y}{z} - \arctg \frac{y}{z} \right] - 2s \right\} \quad (12)$$

$$B''_{xu} = 0 \quad (13)$$

$$B''_{yu} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I'_1 z_1}{s} 2 \left[\arctg \frac{s+y}{z} - \arctg \frac{y}{z} \right] \quad (14)$$

$$B''_{zu} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I'_1 z_1}{s} \ln \frac{(s+y)^2 + z^2}{y^2 + z^2} \quad (15)$$

Stosując zasadę superpozycji oraz przyjmując wcześniej postawione założenie, że $I'_1 = I_1$ wyrażenia na składowe indukcji magnetycznej uzyskuje się w postaci

$$B_{xu} = B'_{xu} + B''_{xu} = 0 \quad (16)$$

$$B_{yu} = B'_{yu} + B''_{yu} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \cdot 2 \left(\arctg \frac{s-y}{z} + \arctg \frac{s+y}{z} \right) \quad (17)$$

$$B_{zu} = B'_{zu} + B''_{zu} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 z_1}{s} \ln \frac{(s-y)^2 + z^2}{(s+y)^2 + z^2} \quad (18)$$

Wyznaczenie składowych indukcji pola magnetycznego pochodzącego od prądu wsadu płynącego w kierunku przeciwnym do prądu wzbudnika jest bardziej skomplikowane. Prąd w wsadzie nie jest rozłożony równomiernie na całej wysokości wsadu. Przebieg jego gęstości podzielić można na dwie części, o różnych wartościach (rys. 4):

- 0,83a A/cm rozłożoną równomiernie na odcinku h_1 wysokości wsadu,
- 0,17a A/cm rozłożoną równomiernie na całej wysokości wsadu h ,

gdzie a oznacza wartość maksymalną gęstości prądu wsadu.

Potencjał wektorowy związany z prądem rozłożonym równomiernie na wysokości h_1 wyraża się zależnością:

$$A'_{mh_1} = -\frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a \left\{ (h_1 + z_0 - z) \ln \left[(h_1 + z_0 - z)^2 + (y - y_0)^2 \right] + \right. \\ \left. + (z - z_0) \ln \left[(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] + \right. \\ \left. + 2(y - y_0) \left[\arctg \frac{h_1 + z_0 - z}{y - y_0} + \arctg \frac{z - z_0}{y - y_0} \right] - 2h_1 \right\} \quad (19)$$

Wobec (6) i (19) składowe indukcji magnetycznej są równe:

$$B'_{xmh_1} = 0 \quad (20)$$

$$B'_{ymh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a \ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (21)$$

$$B'_{z mh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a \cdot 2 \left[\arctg \frac{h_1+z_0-z}{y-y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y-y_0} \right] \quad (22)$$

Analogicznie potencjał wektorowy związany z prądem rozłożonym równomiernie na całej wysokości wsadu h ma postać:

$$\begin{aligned} A'_{mh} = & - \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a \left\{ (h+z_0-z) \ln \left[(h+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2 \right] + \right. \\ & + (z-z_0) \ln \left[(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2 \right] + 2(y-y_0) \times \\ & \left. \times \left[\arctg \frac{h+z_0-z}{y-y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y-y_0} \right] - 2h \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

Na podstawie (23) oraz (6) składowe indukcji magnetycznej są równe:

$$B'_{xmh} = 0 \quad (24)$$

$$B'_{ymh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a \ln \frac{(h+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (25)$$

$$B'_{z mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a \cdot 2 \left[\arctg \frac{h+z_0-z}{y-y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y-y_0} \right] \quad (26)$$

Dla odbicia zwierciadlanego prądu wsadu w rdzeniu magnetycznym potencjały wektorowe oraz składowe indukcji magnetycznej mają odpowiednią postać:

$$\begin{aligned} A''_{mh_1} = & - \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a' \left\{ (h_1+z-z) \ln \left[(h_1+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2 \right] + \right. \\ & + (z-z_0) \ln \left[(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2 \right] + 2(y+y_0) \times \\ & \left. \times \left[\arctg \frac{h_1+z_0-z}{y-y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y+y_0} \right] - 2h_1 \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

$$B''_{xmh_1} = 0 \quad (28)$$

$$B''_{ymh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a' \ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2} \quad (29)$$

$$B''_{z mh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a' \cdot 2 \left[\arctg \frac{h_1+z_0-z}{y+y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y+y_0} \right] \quad (30)$$

$$A''_{mh} = -\frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a' \left\{ (h+z_0-z) \ln \left[(h+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2 \right] + \right. \\ \left. + (z-z_0) \ln \left[(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2 \right] + \right. \\ \left. + 2(y+y_0) \left[\arctg \frac{h+z_0-z}{y+y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y+y_0} \right] - 2h \right\} \quad (31)$$

$$B''_{xmh} = 0$$

$$B''_{ymh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a' \ln \frac{(h+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2} \quad (33)$$

$$B''_{z mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a' 2 \left[\arctg \frac{h+z_0-z}{y+y_0} + \arctg \frac{z-z_0}{y+y_0} \right] \quad (34)$$

Stosując zasadę superpozycji oraz przyjmując wcześniej postawione założenie, że $a' = a$, wypadkowe składowe indukcji magnetycznej związanej z prądem rozłożonym równomiernie na wysokości h_1 są równe:

$$B_{ymh_1} = B^I_{ymh_1} + B^{II}_{ymh_1} = 0 \quad (35)$$

$$B_{ymh_1} = B^I_{ymh_1} + B^{II}_{ymh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a \left[\ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2} + \right. \\ \left. + \ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2} \right] \quad (36)$$

$$B_{z mh_1} = B'_{z mh_1} + B''_{z mh_1} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,83a^2 \left[\arctg \frac{h_1 + z_0 - z}{y - y_0} + \right. \\ \left. + \arctg \frac{h_1 + z_0 - z}{y + y_0} + \arctg \frac{z - z_0}{y - y_0} + \arctg \frac{z - z_0}{y + y_0} \right] \quad (37)$$

Wypadkowe składowe indukcji magnetycznej związanej z prądem rozłożonym równomiernie na całej wysokości wządu są równe:

$$B_{x mh} = B'_{x mh} + B''_{x mh} = 0 \quad (38)$$

$$B_{y mh} = B_{y mh} + B''_{y mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a \left[\ln \frac{(h - z_0 - z)^2 + (y - y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2} + \right. \\ \left. + \ln \frac{(h + z_0 - z)^2 + (y + y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y + y_0)^2} \right] \quad (39)$$

$$B_{z mh} = B'_{z mh} + B''_{z mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 0,17a^2 \left[\arctg \frac{h + z_0 - z}{y - y_0} + \right. \\ \left. + \arctg \frac{h + z_0 - z}{y + y_0} + \arctg \frac{z - z_0}{y - y_0} + \arctg \frac{z - z_0}{y + y_0} \right] \quad (40)$$

Składowe indukcji magnetycznej wywołanej całkowitym prądem wządu są odpowiednio równe:

$$B_{x m} = B_{x mh_1} + B_{x mh} = 0 \quad (41)$$

$$B_{y m} = B_{y mh_1} + B_{y mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} a \left\{ 0,83 \left[\ln \frac{(h_1 + z_0 - z)^2 + (y - y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2} + \right. \right. \\ \left. + \ln \frac{(h_1 + z_0 - z)^2 + (y + y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y + y_0)^2} \right] + 0,17 \left[\ln \frac{(h + z_0 - z)^2 + (y - y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y - y_0)^2} + \right. \\ \left. + \ln \frac{(h + z_0 - z)^2 + (y + y_0)^2}{(z - z_0)^2 + (y + y_0)^2} \right] \right\} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
 B_{zm} = B_{zmh_1} + B_{z mh} = \frac{\mu_0}{4\pi} 2a \left[0,83 \left(\operatorname{arc\,tg} \frac{h_1+z_0-z}{y-y_0} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \operatorname{arc\,tg} \frac{h_1+z_0-z}{y+y_0} + \operatorname{arc\,tg} \frac{z-z_0}{y-y_0} + \operatorname{arc\,tg} \frac{z-z_0}{y+y_0} \right) + \right. \\
 \left. + 0,17 \left(\operatorname{arc\,tg} \frac{h+z_0-z}{y-y_0} + \operatorname{arc\,tg} \frac{h+z_0-z}{y+y_0} + \operatorname{arc\,tg} \frac{z-z_0}{y-y_0} + \operatorname{arc\,tg} \frac{z-z_0}{y+y_0} \right) \right] \quad (43)
 \end{aligned}$$

Suma (17) i (42) określa wypadkową składową poprzeczną indukcji magnetycznej, czyli:

$$\begin{aligned}
 B_{pw} = B_{yu} + B_{ym} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{I_1 z_1}{s} 2 \left(\operatorname{arc\,tg} \frac{s-y}{z} + \operatorname{arc\,tg} \frac{s+y}{z} \right) + \right. \\
 \left. + a \left[0,83 \left(\ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2} + \ln \frac{(h_1+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2} \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + 0,17 \left(\ln \frac{(h+z_0-z)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y-y_0)^2} + \ln \frac{(h+z_0-z)^2 + (y+y_0)^2}{(z-z_0)^2 + (y+y_0)^2} \right) \right] \right] \quad (44)
 \end{aligned}$$

3.3. Obliczenie rozkładu składowej poprzecznej indukcji magnetycznej w prototypie dozownika

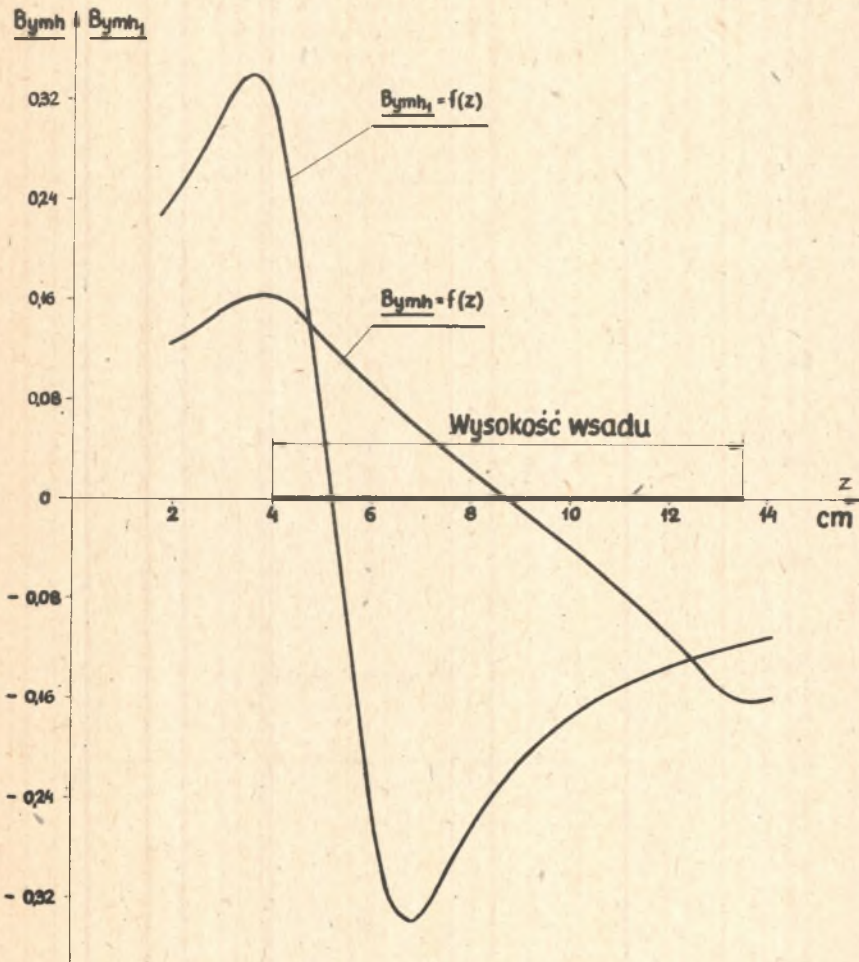
Na podstawie [2] przyjęto do obliczeń następujące dane wymiarowe dozownika (rys. 5)

$$\begin{aligned}
 y_0 &= 70 \text{ mm} \\
 y &= 80 \text{ mm} \\
 z_0 &= 40 \text{ mm} \\
 h_1 &= 24 \text{ mm} \\
 h &= 95 \text{ mm} \\
 s &= 110 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Ponadto z pomiarów dokonanych na urządzeniu prototypowym wynika, że przepływ wzbudnika jest dwukrotnie większy od przepływu wsadu. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że $a = 1 \text{ A/cm}$ a wyniki odniesione do wartości maksymalnej składowej poprzecznej indukcji magnetycznej B_{pw} przedstawiono wykreślnie w postaci następujących zależności:

$$\underline{B_{ymh_1}} = f(z) \text{ wg (36)} \quad \text{oraz} \quad \underline{B_{ymh}} = f(z) \text{ wg (39)} \quad (\text{rys. 6})$$

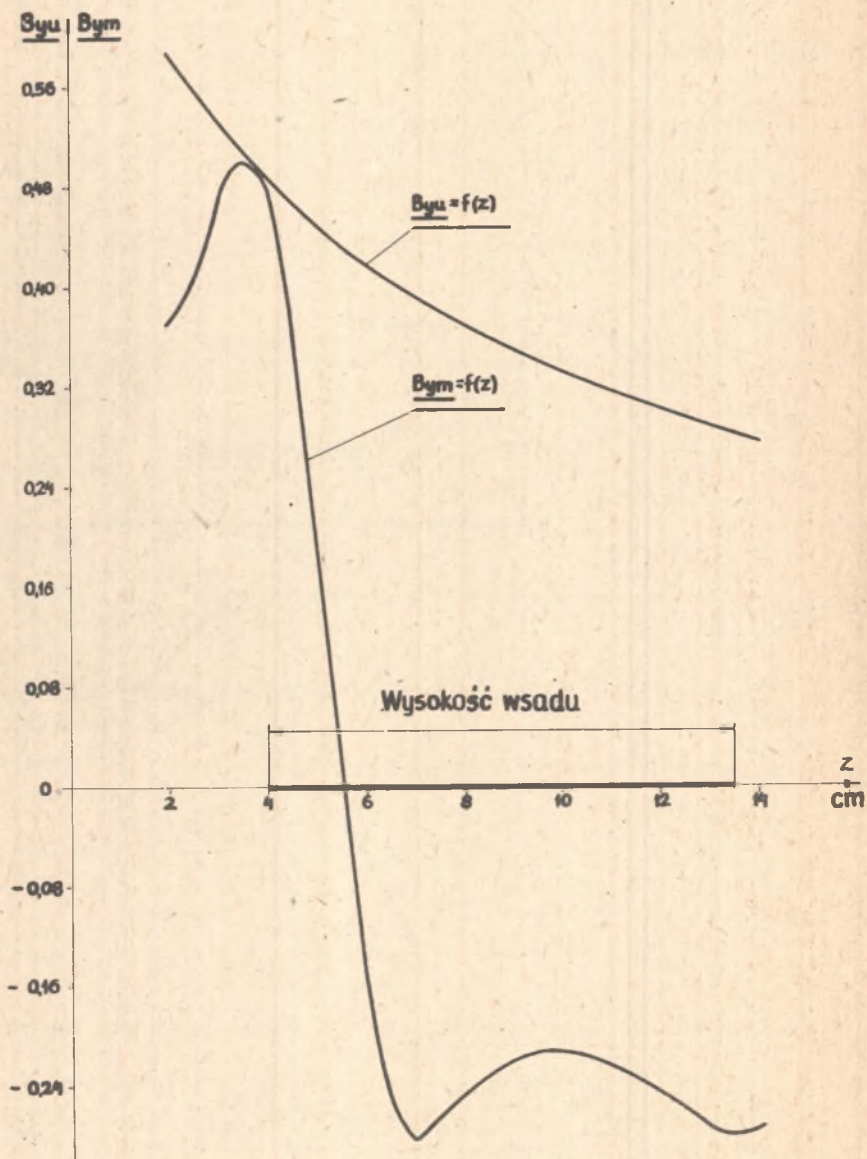
- $B_{ym} = f(z)$ wg (42) oraz $B_{yu} = f(z)$ wg (17) (rys. 7)
- $B_{pw} = f(z)$ wg (44) (rys. 8).



Rys. 6. Rozkład składowych B_{ymh_1} i B_{ymh} wzdłuż wysokości wsadu

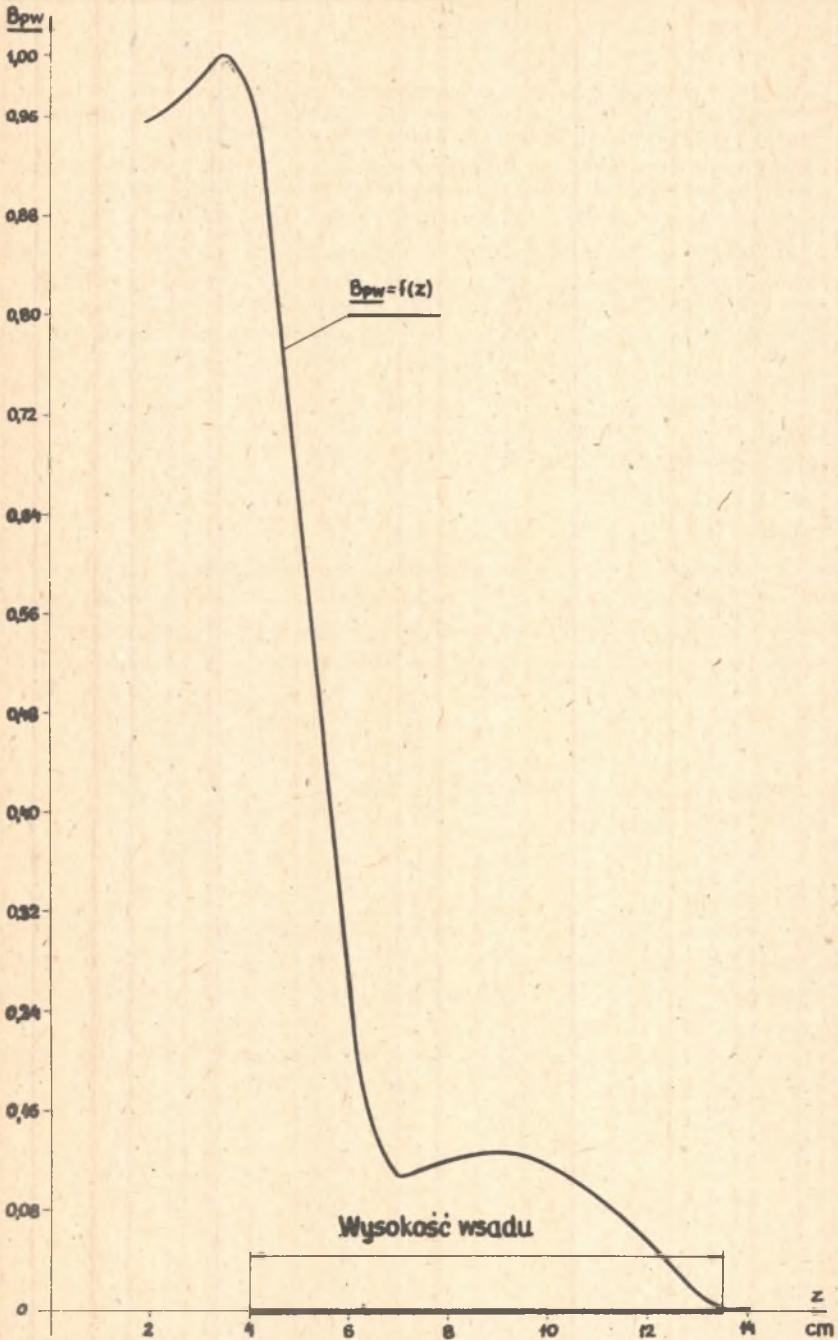
$$\frac{B_{ymh_1}}{B_{pw \max}} = \frac{B_{ymh_1}}{B_{pw \max}}; \quad \frac{B_{ymh}}{B_{pw \max}} = \frac{B_{ymh}}{B_{pw \max}}$$

Z porównania przebiegu krzywej $B_{pw} = f(z)$ (rys.8) z krzywą otrzymaną pomiarowo [2] wynika, że mimo przyjęcia daleko idących uproszczeń, obliczony rozkład składowej poprzecznej indukcji magnetycznej metodą przedstawioną w artykule jest zadowalająco zbieżny z rozkładem uzyskanym na podstawie pomiarów.



Rys. 7. Rozkład składowych $\frac{B_{ym}}{B_{pw \max}}$ i $\frac{B_{yu}}{B_{pw \max}}$ wzdłuż wysokości wsadu

$$\frac{B_{ym}}{B_{pw \max}} = \frac{B_{ym}}{B_{pw \max}}; \quad \frac{B_{yu}}{B_{pw \max}} = \frac{B_{yu}}{B_{pw \max}}$$



Rys. 8. Przebieg wypadkowej składowej poprzecznej B_{pw} wzdłuż wysokości wsadu

$$\frac{B_{pw}}{B_{pw \max}} = \frac{B_{pw}}{B_{pw \max}}$$

4. LITERATURA

- [1] Fikus F.: Modele i prototypy urządzeń do transportu ciekłego metalu. Praca II Seminarium: Rola badań laboratoryjnych w nowoczesnej technologii. Politechnika Śląska, Katowice-Wisła 1972.
- [2] Fikus F., Chruślicki W., Goczyński L.: Dozownik elektrodynamiczny. Sesja Naukowa Dnia Hutnika, Politechnika Śl., Katowice 1973.
- [3] Turowski J.: Elektrodynamika techniczna. WNT, Warszawa 1968.
- [4] Jezierski E.: Transformatory. Podstawy teoretyczne. WNT Warszawa 1965.
- [5] Binns K.J., Lawrenson P.J.: Analysis and computation of electric and magnetic field problems. Pergamon Press, Oxford 1963.
- [6] Goworkow W.A.: Pola elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1962.

УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ ДОЗАТОРЕ

Р е з ю м е

Анализ магнитного поля в электродинамическом дозаторе к жидкому металлу. В расчете магнитного поля систем переменного тока ограниченных железом использовано теорию постоянного магнитного поля ограниченного железом.

Пример расчета для электродинамического дозатора к жидкому металлу.

SIMPLIFIED ANALYSIS OF THE MAGNETIC FIELD
IN AN ELECTRODYNAMIC FEEDER

S u m m a r y

The analysis of the magnetic field in an electrodynamic feeder for liquid metals. The theory of the constant magnetic field surrounded by iron has been used to estimate the magnetic field of the alternating current systems surrounded by iron.

The example of calculation for an electrodynamic feeder for liquid metals has been presented in the article.