ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1982

Seria: ELEKTRYKA z. 82 Nr kol. 723

Adam RÓŻYCKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

PROBLEMY TECHNICZNE ZBIERACZY PRĄDOWYCH Z CIEKŁEGO METALU W NADPRZEWODNIKOWYCH MASZYNACH UNIPOLARNYCH

Streszczenie. Przedstawione zostały podstawowe problemy konstrukcyjno-obliczeniowe, dotyczące zbieraczy prądowych z ciekłego metalu, stosowanych w nadprzewodnikowych maszynach unipolarnych. Podano zależności dla obliczenia strat w ciekłym metalu oraz warunki stabilności pracy zbieracza prądowego.

Omówiono ciekawsze rozwiązania patentowe.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienie doprowadzenia bądź odprowadzenia prądu twornika w nadprzewodnikowych maszynach unipolarnych posiada decydujące znaczenie i zasadniczo wpływa na sprawność i moc znamionową uzyskiwaną z jednostki objętości maszyny [1],[7].

Zbieracze prądowe, w których wykorzystuje się ciekły metal jako medium pośredniczące w przewodzeniu prądu między elektrodami metalowymi, posiadają w porównaniu do zestyków szczotkowych szereg zalet, a mianowicie:

a) pozwalają na stosowanie gęstości prądowych rzędu kilkuset $\frac{A}{cm^2}$ a nawet więcej,

b) dopuszczalne są znacznie większe prędkości obwodowe elektrody ruchomej, rzędu 150 - 200 $\frac{m}{s}$,

c) przewodzenie prądu odbywa się na całej powierzchni elektrod zwilżanych metalem, co pozwala na obciążenie zbieracza znacznymi prądami,

d) w celu zainicjowania przewodzenia prądu drogą przebić powłok stykowych wymagane jest napięcie rzędu 0,01 V, co znacznie zmniejsza straty elektryczne,

e) dobra przewodność cieplna niektórych ciekłych metali ułatwia chłodzenie styku.

Do wad zbieraczy prądowych z ciekłego metalu zaliczyć należy toksyczność (w przypadku rtęci), utratę własności fizykochemicznych pod wpływem wilgoci, możliwość występowania przerw łukowych przy przeciążeniach, reaktywność ciekłego metalu z elementami konstrukcyjnymi i izolacją.

W artykule przedstawiono problemy, na które należy zwrócić uwagę przy projektowaniu zbieraczy prądowych z ciekłego metalu.

2. STRATY W ZBIERACZACH PRĄDOWYCH Z CIEKŁEGO METALU

Straty występujące w zbieraczach prądowych z ciekłego metalu można podzielić na straty elektryczne, wynikłe z przepływu prądu przez obszar styku i straty tarcia, tj. straty hydrodynamiczne spowodowane ruchem cieczy.

Poza tym w strefie styku występują straty magnetohydrodynamiczne od pól magnetycznych przenikających do obszaru zbieracza. Te ostatnie uwidaczniają się szczególnie przy nadprzewodnikowych uzwojeniach wzbudzenia.

2.1. Straty elektryczne

Straty elektryczne obliczamy z zależności

$$\Delta P_{el} = I \ \Delta U_k,$$

gdzie:

I - prąd obciążenia,

ΔU_k - spadek napięcia na styku będący sumą trzech składowych:

$$\Delta U_k = \Delta U_{k,m} + \Delta U_m + \Delta U_{m,k},$$

gdzie:

ΔU_m - spadek napięcia w ciekłym metalu,

$\Delta U_{k,m}$, $\Delta U_{m,k}$ - spadek napięcia w przygranicznej warstwie między ruchomym, względnie nieruchomym stykiem a ciekłym metalem.

Wielkości spadków napięć w przygranicznych warstwach są znacznie większe od spadku napięcia w samej objętości medium przewodzącego prąd.

Straty elektryczne w objętości ciekłego metalu w zbieraczach prądowych o prostokątnym przekroju poprzecznym styku wyrażają się zależnością:

$$\Delta P_{el,m} = I \ \Delta U_m = \varrho \frac{\delta}{s} I^2,$$

gdzie:

ϱ - rezystywność ciekłego metalu,

δ - promieniowa długość szczeliny zbieracza,

s - powierzchnia styku ciekłego metalu z elektrodą $s = 2\pi r w$,

r - promień elektrody zbieracza,

w - szerokość styku zbieracza.

Straty elektryczne w przygranicznej warstwie zbieracza prądowego:

$$\Delta P_{el,kmk} = 2\, I\, \Delta U_{k,m} = \frac{\varepsilon_k}{s} I^2 = \varepsilon_k\, j\, I,$$

gdzie $\varepsilon_k = \frac{2\ \Delta U_{k,m}}{j}$ określa się jako stosunek przygranicznego spadku napięcia obu elektrod zbieracza prądowego do odpowiadającej mu gęstości prądowej.

Spadki napięcia w warstwach bezpośredniego zetknięcia się cieczy metalicznej z powierzchniami metalowymi elektrod uwarunkowane są szeregiem czynników, a mianowicie: rodzajem stosowanej cieczy i materiałem na elektrody, obecnością tlenków względnie siarczków metali, zawartością gazów, pary wodnej powstających w procesie przewodzenia prądu, stanem chropowatości powierzchni oraz wielkością ciśnienia panującego w cieczy.

Prowadzone w tym zakresie prace [5],[11] podają przesłanki jakościowe i częściowo ilościowe dla określenia rezystancji styków w warstwie przygranicznej.

W tabeli I zestawiono wartości ε_k określone eksperymentalnie [6],[12] dla różnych układów "elektroda-ciekły metal", z której wynika, że ε_k dla elektrod wykonanych z miedzi jest o trzy rzędy niższe niż dla elektrod stalowych.

Tabela I

Zależność ε_k dla różnych układów ciecz-elektroda

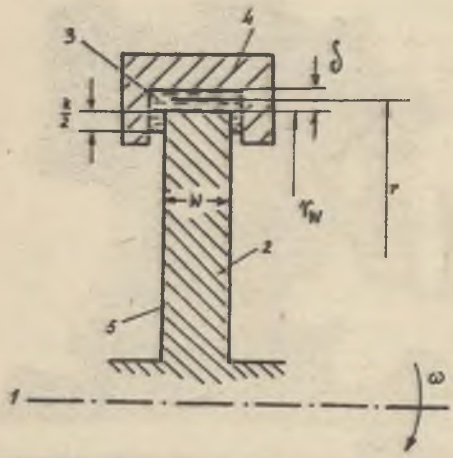
Ciekły metal	$\varepsilon_k \left[\frac{V\ m^2}{A}\right]$ dla materiału pierścienia wykonanego ze	
	stali	miedzi
Hg	$0{,}1 \cdot 10^{-6}$	$0{,}1 \cdot 10^{-9}$
$NaK_{(70)}$	$(1 \div 0{,}1) \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
$HgIn_{(32)}$	$0{,}01 \cdot 10^{-6}$	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$
$HgIn_{(50)}$	$0{,}01 \cdot 10^{-6}$	-
Sn, Bi, Pb, In	$0{,}0025 \cdot 10^{-6}$	-
Szczotki grafitowe	$27 \cdot 10^{-6}$	$27 \cdot 10^{-6}$

Obniżenie ε_k osiąga się przez platerowanie elektrod miedzianych srebrem lub złotem. Jeżeli miedziane elektrody stykowe nie mogą być wykorzy-

stane na elektrody wirnika ze względu na wytrzymałość mechaniczną, należy stosować elektrody stalowe względnie tytanowe, powierzchniowo pokrywane miedzią. W przypadku stosowania rtęci dobre efekty daje platerowanie elektrod miedzianych niklem i rodem. Badania wykazały również niestabilność rezystancji przejścia warstwy przygranicznej. W miarę wzrostu czasu eksploatacji rezystancja styku wzrasta, osiągając ustaloną wartość po różnym okresie czasu, zależnym od typu stosowanego łącza. Dobrą stabilność posiadają pokrycia molibdenowe oraz niklowe. W pracy [4] stwierdzono wpływ temperatury ciekłego metalu na wartość δ_k.

2.2. Straty hydrodynamiczne

Przy wirowaniu jednej z elektrod zbieracza prądowego w zapełnionej cieczą szczelinie pierścieniowej, wynikają straty energii w wyniku mechanicznego tarcia cząstek cieczy. Obliczenie strat hydrodynamicznych napotyka na trudności szczególnie przy geometrycznie złożonym kształcie zbieracza.



Rys. 1. Podstawowe wymiary geometryczne zbieracza prądowego z ciekłego metalu o prostokątnym kształcie styku
1 - oś wirowania, 2 - elektroda ruchoma, 3 - ciekły metal, 4 - elektroda nieruchoma, 5 - izolowana powierzchnia boczna tarczy

Dla zbieracza prądowego o prostokątnym kształcie styku (rys.1) straty hydrodynamiczne wynoszą [4]:

$$\Delta P_h = \frac{\pi}{4} f \gamma V_r^3 (w+k) r,$$

gdzie:

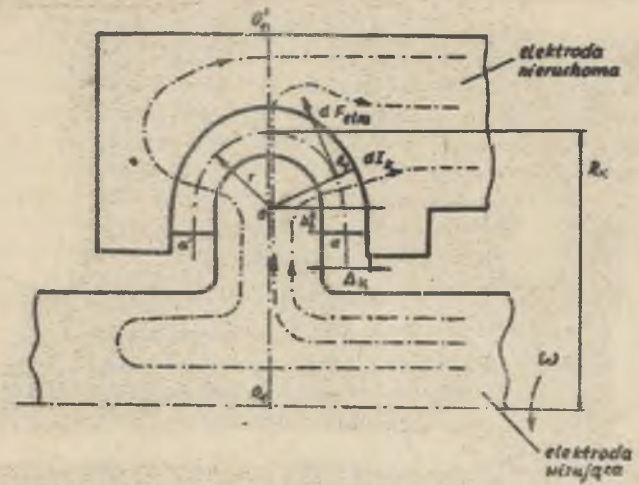
- f - współczynnik tarcia,
- γ - gęstość ciekłego metalu,
- V_r - prędkość obwodowa elektrody wirującej,
- r - promień elektrody wirującej,
- w - szerokość styku zbieracza,
- k - dodatkowa długość styku z cieczą wzdłuż promieniowego boku zbieracza.

Dla zbieracza prądowego o owalnym kształcie styku (rys. 2) straty hydrodynamiczne [12] wynoszą:

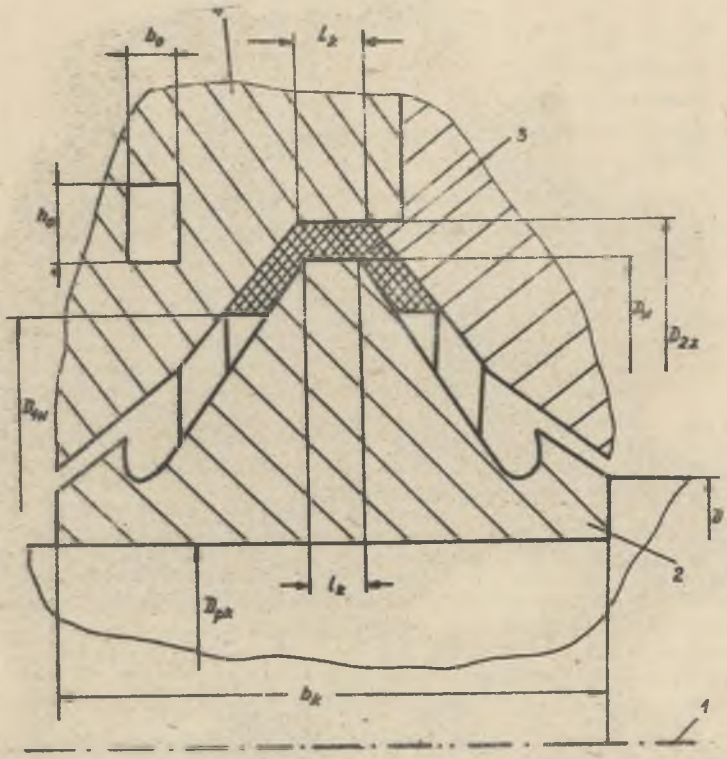
$$\Delta P_h = \omega M_h$$

gdzie: $M_h = c \gamma s_1 D_k^4 \omega^3$,

przy czym: ω - prędkość kątowa, M_h - moment tarcia, s_1 - długość drogi ślizgania w poprzecznym przekroju pierścienia, c - współczynnik tarcia zależny od liczby Reynoldsa i kinematycznej lepkości cieczy, D_k - średnica elektrody.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny zbieracza prądowego z ciekłego metalu o owalnym kształcie styku



Rys. 3. Podstawowe wymiary geometryczne zbieracza prądowego z ciekłego metalu o trapezowym kształcie styku

1 - oś wirowania, 2 - elektroda ruchoma, 3 - ciekły metal, 4 - elektroda nieruchoma

Dla zbieracza prądowego o trapezowym kształcie styku (rys. 3) straty hydrodynamiczne [1] wynoszą:

$$\Delta P_h = 8\, c_1 \gamma D_w v_r^3,$$

gdzie:

c_1 - współczynnik tarcia,

v_r - prędkość obwodowa elektrody wirującej.

Bardziej uogólnioną metodę obliczenia strat hydrodynamicznych podano w pracy [3]. Wykorzystanie metody analizy wymiarowej pozwoliło na przejście od zależności między wielkościami fizycznymi opisującymi straty hydrodynamiczne do równań bezwymiarowych, złożonych z tych fizycznych wielkości, a tym samym zmniejszyć liczbę zmiennych i zakres badań na modelach doświadczalnych.

Wychodząc z podstawowej zależności:

$$\Delta P_h = f(\mu \gamma \omega R\, s),$$

gdzie:

γ - gęstość cieczy,

μ - lepkość cieczy,

ω - prędkość kątowa elektrody wirującej,

R - promień elektrody,

s - powierzchnia pierścieniowego kanału omywanego cieczą

wyprowadzono uniwersalne zależności dla przypadku zbieraczy prądowych z wirującą elektrodą:

wewnętrzną
$$\frac{\Delta P_h}{\nu \gamma \omega^2 R\, s} = 2{,}25 \left(\frac{\omega R^2}{\nu}\right)^{0{,}46}$$

zewnętrzną
$$\frac{\Delta P_h}{\nu \gamma \omega^2 R\, s} = 0{,}006645 \left(\frac{\omega R^2}{\nu}\right)^{0{,}8257}$$

gdzie: ν - kinematyczna lepkość cieczy.

Związki te obowiązują dla stosunkowo szerokiego zakresu zmian prędkości obwodowej elektrody ($v = 50 \div 150\ \frac{m}{s}$), dla małych w stosunku do średnicy D wymiarów kanału pierścieniowego omywanego cieczą i przy małej długości szczeliny między cylindrycznymi powierzchniami, którą na ogół wybiera się z zależności

$$\delta \geq 0{,}118 \frac{D}{Re^{0{,}182}}$$

2.3. Straty magnetohydrodynamiczne

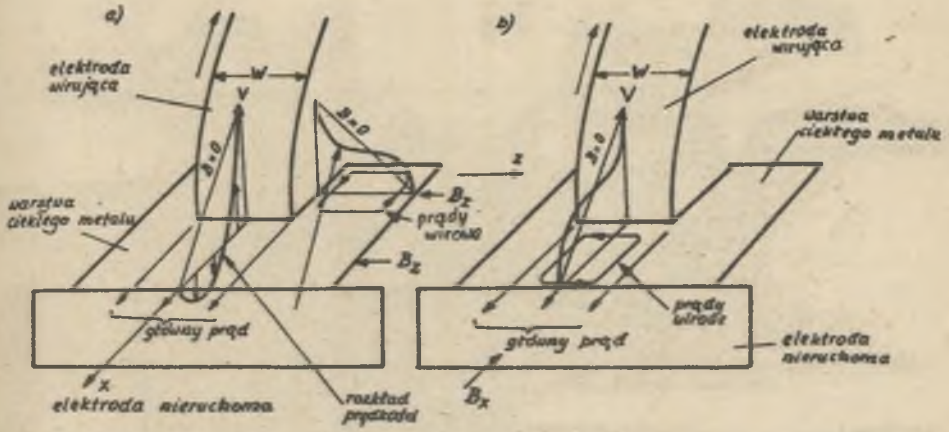
W unipolarnych maszynach prądu stałego posiadających nadprzewodnikowe uzwojenie wzbudzenia, obszar zbieraczy prądowych może być poddany silnemu działaniu pola magnetycznego. Współdziałanie promieniowego prądu obciążenia ze składową poosiową, względnie promieniową, zewnętrznego pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia a przenikającego w obszar zbieracza, może spowodować powstanie strat magnetohydrodynamicznych, zależnych od wielkości i kierunku indukcji zewnętrznego pola magnetycznego, gęstości prądu w styku, geometrycznych wymiarów zbieracza, własności fizycznych stosowanych cieczy, charakteru ruchu cieczy itp.

Poosiowe pole magnetyczne (B_z) współdziałając z prądem obciążenia o gęstości (j_x) powoduje zmianę prędkości ciekłego metalu o lepkości dynamicznej (μ) w szczelinie (δ) między elektrodami (rys. 4). Prędkość cieczy w tych warunkach może być obliczona z równania:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{j_x B_z}{\mu}.$$

Przyjmując j_x, B_z = const oraz wykorzystując warunki brzegowe dla x=0, $v=v_k$ oraz dla $x=\delta$, v = 0 mamy:

$$v = \frac{j_x B_z}{\mu} \cdot \frac{x^2}{2} - \left(\frac{v_k}{\delta} + \frac{j_x B_z}{2\mu}\delta\right)x + v_k.$$



Rys. 4. Rozkład prędkości cieczy w styku zbieracza prądowego z ciekłego metalu oraz powstawanie prądów wirowych w wyniku działania składowej poosiowej B_z(a) i składowej promieniowej B_x(b) zewnętrznego pola magnetycznego

Prędkość ciekłego metalu V wzdłuż długości szczeliny nie jest liniowa, jak w przypadku gdy B_z = 0, lecz może zmieniać się w sposób monotoniczny, zachowując stale wartość jednego znaku, względnie zmieniać znak, przechodząc przez zerową wartość prędkości obrotowej. W wyniku zmian prędkości ruchu cieczy występuje wewnętrzne tarcie w ciekłym metalu, a tym samym wzrost strat hydrodynamicznych przepływu.

W pracy [4] podano zależność na obliczenie strat wywołanych działaniem poosiowego pola magnetycznego (B_z) na ciekły metal w zbieraczu prądowym o prostokątnym przekroju szczeliny między elektrodami. Wynoszą one:

$$\Delta P_{mhd} = \frac{\pi}{4} f \gamma v_k^3 r (w + k)(1 + 3\varkappa^2) \quad \text{dla} \quad 0 < \varkappa < 1$$

lub

$$\Delta P_{mhd} = \frac{\pi}{4} f \gamma v_k^3 r (w + k)(1 + \varkappa)\sqrt{2\varkappa - 1} \quad \text{dla} \quad \varkappa > 1,$$

gdzie bezwymiarowy wskaźnik

$$\varkappa = \frac{2 B_z j_x \delta}{f \gamma v_k^2}.$$

Zależność ta redukuje się do podstawowych strat hydrodynamicznych, gdy $\varkappa = 0$, tj. przy $\bar{j}_x \cdot \bar{B}_z = 0$.

W zależności od wartości bezwymiarowego wskaźnika $\varkappa$, średnia prędkość ruchu turbulentnego ciekłego metalu w szczelinie wynosi:

przy $\varkappa = 0$ $$v_{śr} = \frac{v_k}{2},$$

przy $0 < \varkappa < 1$ $$v_{śr} = \frac{v_k}{2}(1 - \varkappa) \quad \text{(dodatnia)},$$

przy $\varkappa > 1$ $$v_{śr} = \frac{v_k}{2}(1 - \sqrt{2\varkappa - 1}) \quad \text{(ujemna)}.$$

Istnieje możliwość zminimalizowania strat magnetohydrodynamicznych dla odpowiednio dobranej długości szczeliny δ.
Wychodząc z warunku:

$$\frac{d}{d\varkappa}(\Delta P_{mhd}) = 0 \quad \text{mamy} \quad \varkappa_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

stąd $$\Delta P_{mhd,min} = \frac{\sqrt{3}}{2} B_z I_x v_k \delta m$$

przy $$I_x = j_x 2\pi r w, \quad m = \frac{w + k}{w}$$

Z warunku $$\varkappa_{opt} = \frac{2 B_z j_x \delta}{f \gamma v_k} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

możemy obliczyć [8] gęstość prądu j_x odpowiadającą minimalnym stratom;

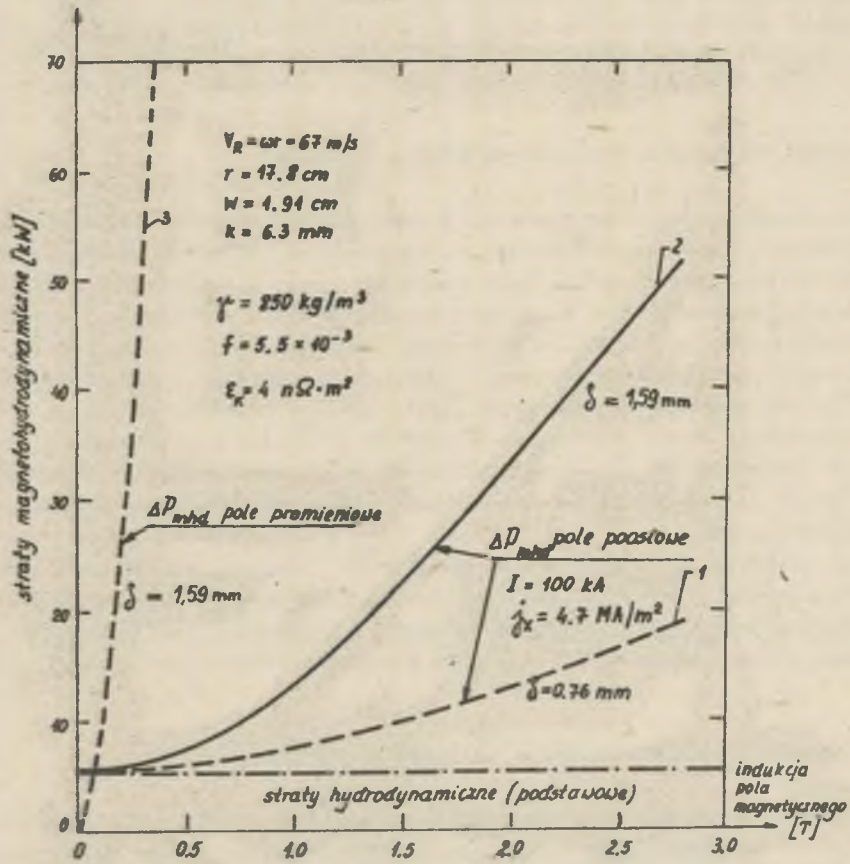
$$j_{x,min} = \frac{f \gamma v_k^2}{2\sqrt{3} B_z \delta}$$

oraz optymalne geometryczne wymiary strefy styku

$$\frac{\delta}{w} = \frac{\pi r f \gamma v_k^2}{\sqrt{3} B_z I_x}$$

Na zbieracz prądowy z ciekłego metalu może działać również promieniowe pole magnetyczne (B_x), wytwarzające prądy cyrkulacyjne, które zgodnie z pracą [4] określa się z zależności:

$$\Delta P_{mhd} = \frac{(\omega B_x)^2 (r\ w)^3}{6(\gamma \delta + \varepsilon_k)}.$$



Rys. 5. Wpływ indukcji poosiowego pola magnetycznego B_z (krzywa 1,2) i promieniowego pola magnetycznego B_x (krzywa 3) na wielkość strat magnetohydrodynamicznych w zbieraczu prądowym z NaK

Na rys. 5 przedstawiono udział strat magnetohydrodynamicznych od pola poosiowego i promieniowego w funkcji indukcji dla dwóch różnych długości szczeliny zbieracza prądowego ze stopu NaK, w porównaniu do podstawowych strat hydrodynamicznych. Już przy małych wartości indukcji promieniowej B_x

występują znaczne straty, zależne od trzeciej potęgi szerokości (w) zbieracza prądowego.

W pracy [2] przedstawiono porównanie całkowitych strat w zbieraczu prądowym o prostokątnym kształcie styku dla różnych cieczy (NaK, GaIn) w zależności od prędkości obwodowej v_k elektrody. Przy zerowej poosiowej indukcji pola magnetycznego, zbieracz ze stopu NaK wykazuje mniejsze straty. Zestyki ślizgowe w postaci szczotek metalowo-grafitowych, szczotek z włókien węglowych, charakteryzują się znacznie podwyższonymi stratami. W przypadku obecności pola magnetycznego poosiowego o wartości $B_z < 0,5$ T [2] pożądany jest stop NaK, natomiast przy polach większych od 0,5 T, korzystniejszy jest GaIn ze względu na nieco mniejsze straty w styku.

3. DOBÓR OPTYMALNYCH WYMIARÓW ZBIERACZA PRĄDOWEGO

W celu powiększenia sprawności maszyny unipolarnej, należy minimalizować straty w zbieraczach prądowych. Podstawowym wymiarem geometrycznym, który należy optymalizować, jest szerokość (w) elektrody w zbieraczu prostokątnym, względnie (l_k) w zbieraczu owalnym. Analizując wyrażenia na straty można zauważyć, że zmniejszenie wymiaru (w) lub (l_k) prowadzi do obniżenia strat hydrodynamicznych i magnetohydrodynamicznych, lecz powiększa straty elektryczne. Optymalizację zbieracza prądowego z NaK o owalnym kształcie styku przedstawiono w pracy [11], zaś o prostokątnym kształcie w zależności od szerokości elektrody (w) i wskaźnika δ_k w pracy [4]. Optymalna szerokość elektrody zbieracza prądowego określona jest linią minimalnych strat.

Ze wzrostem δ_k szczególnie dla wąskich elektrod, straty bardzo silnie wzrastają. Przy założonej wartości δ_k wzrastająca szerokość elektrody będzie pomniejszać straty aż do chwili, gdy straty tarcia w cieczy spowodowane dużą powierzchnią zwilżania będą przewyższać straty elektryczne.

4. STABILNOŚĆ PRACY ZBIERACZY PRĄDOWYCH Z CIEKŁEGO METALU

Prawidłowa eksploatacja maszyny unipolarnej w normalnych i zaburzeniowych warunkach pracy jest uwarunkowana poprawnym działaniem zbieracza prądowego. Do najbardziej groźnych awaryjnych przypadków pracy zaliczyć należy zerwanie ciągłości styku w szczelinie między elektrodami, co może wystąpić w wyniku wypłynięcia cieczy ze strefy styku. Wypchnięcie cieczy może być np. spowodowane przeciążeniami prądowymi maszyny i wynikającymi stąd niewyważonymi siłami elektromagnetycznymi.

Niezbędne jest więc określenie dopuszczalnej wartości prądu obciążenia zapewniającego stabilne położenie warstwy ciekłego metalu w zbieraczu prądowym. Położenie to określa się z bilansu sił działających na ciekły me-

tal, tj. siły grawitacyjnej, odśrodkowej, tarcia hydraulicznego i siły elektromotorycznej. Ta ostatnia może być wynikiem wzajemnego działania prądu obciążenia z polem magnetycznym w strefie roboczej wytworzonym przez układ wzbudzający maszyny (pole obce) względnie polem własnym wytworzonym przez prąd obciążenia płynący w elementach konstrukcyjnych zbieracza. Wielkość i kierunek tych sił są złożone i zależą od fizycznych własności cieczy i natężenia pola magnetycznego, wielkości prądu obciążenia, prędkości obrotowej wirnika oraz geometrii i zastosowanego materiału na elementy konstrukcyjne zbieracza. Zazwyczaj zbieracze prądowe są tak zaprojektowane, aby ciśnienie odśrodkowe utrzymywało ciekły metal w szczelinie pierścieniowej, natomiast przy niskich prędkościach obrotowych muszą być stosowane specjalne rozwiązania względnie uszczelnienia zapobiegające ucieczce ciekłego metalu ze strefy styku.

4.1. Obliczenie siły grawitacyjnej

Dla zbieracza prądowego o prostokątnym kształcie styku, ciśnienie grawitacyjne na ciecz wynosi:

$$p_c = \frac{P_c}{2\pi r h} = \rho g w,$$

gdyż siła ciężkości $P_c = m g = V \rho g$,

gdzie:

ρ - gęstość cieczy,
g - przyspieszenie ziemskie,
w - szerokość elektrody.

4.2. Obliczenie siły odśrodkowej

Ciśnienie w cieczy od siły odśrodkowej w zbieraczu o prostokątnym kształcie styku wynosi:

$$p_{odś} = \rho \left(\frac{v_k}{2}\right)^2 \frac{\Delta_r}{r}$$

gdzie:

v_k - średnia prędkość cieczy w szczelinie,
Δ_r - różnica wysokości między dwoma brzegami poziomu cieczy,
r - promień wirnika.

Dla zbieracza prądowego o owalnym kształcie styku średnia siła odśrodkowa na powierzchnię cieczy [10]

$$P_{odśr} = p_{odśr} s_c,$$

gdzie ciśnienie w cieczy od siły odśrodkowej

$$p_{odśr} = \gamma R_k \omega^2 h_\delta ,$$

zaś powierzchnia cieczy

$$a_c = 2\pi R_k \Delta_k ,$$

stąd $$p_{odśr} = 2\pi R_k^2 \Delta_k \omega^2 h_\delta \gamma ,$$

względnie przy założeniu $$\omega = \frac{\omega_1}{\sqrt{3}}$$

$$p_{odśr} = \frac{2\pi}{3}\gamma R_k^2 \omega_1^2 h_\delta \Delta_k ,$$

gdzie:

R_k - średni promień wirującej elektrody,
ω_1 - prędkość kątowa cieczy,
h_δ - odległość rozpatrywanego punktu od swobodnej powierzchni cieczy,
Δ_k - długość szczeliny między elektrodami.

4.3. Obliczenie siły elektromagnetycznej

W przypadku zbieracza prądowego o prostokątnym kształcie styku

$$F_{em} = B_c I w ,$$

gdzie $$B_c = \mu_o \frac{I}{2\pi r} ,$$

stąd ciśnienie elektromagnetyczne działające na ciecz

$$p_{em} = \frac{F_{em}}{2\pi r w} = \frac{\mu_o I^2}{(2\pi r)^2} ,$$

gdzie:

I - prąd obciążenia,
r - promień elektrody.

Dla zbieracza prądowego o owalnym kształcie styku [11]

$$F_{em} = \frac{\mu_o \Delta_k I^2}{4\pi R_k} .$$

4.4. Warunki stabilności pracy zbieracza prądowego

Ponieważ siły grawitacyjne stanowią mniej niż 1% sił odśrodkowych, a siły tarcia dynamicznego są uwzględnione w wyrażeniu na siły elektromagnety-

czne, stąd stabilność położenia warstwy ciekłego metalu określona jest warunkiem równowagi ciśnień lub sił; odśrodkowych i elektromagnetycznych.

Dla zbieracza o prostokątnym kształcie styku równowaga ciśnień zachodzi, gdy:

$$p_{odśr} = p_{em}, \quad \text{czyli} \quad \gamma \left(\frac{v_k}{2}\right)^2 \frac{\Delta r}{r} = \frac{\mu_o I^2}{(2\pi r)^2}$$

stąd

$$\Delta r = \frac{\mu_o I^2}{4\pi^2 r \gamma \left(\frac{v_k}{2}\right)^2}$$

Maksymalna wartość prądu obciążenia, przy której ciekły metal nie będzie mógł być utrzymany w szczelinie siłą odśrodkową i nastąpi wypływ cieczy ze zbieracza, wynosi:

$$I_{max} = 2\pi v_k \sqrt{\frac{r \gamma \Delta r_{max}}{4 \mu_o}}$$

Dla zbieracza o owalnym kształcie styku z warunku równości

$$F_{odśr} = F_{em} \quad \text{mamy} \quad \frac{2\pi}{3} \gamma R_k^2 \omega_1^2 h_\delta \Delta_k = \frac{\mu_o \Delta_k I^2}{4\pi R_k},$$

stąd

$$h_\delta = 4{,}78 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{\omega_1^2 \gamma R_k^3}$$

Maksymalna wartość prądu

$$I_{max} = 1{,}446 \cdot 10^4 \sqrt{\gamma R_k h_{\delta\, max}}$$

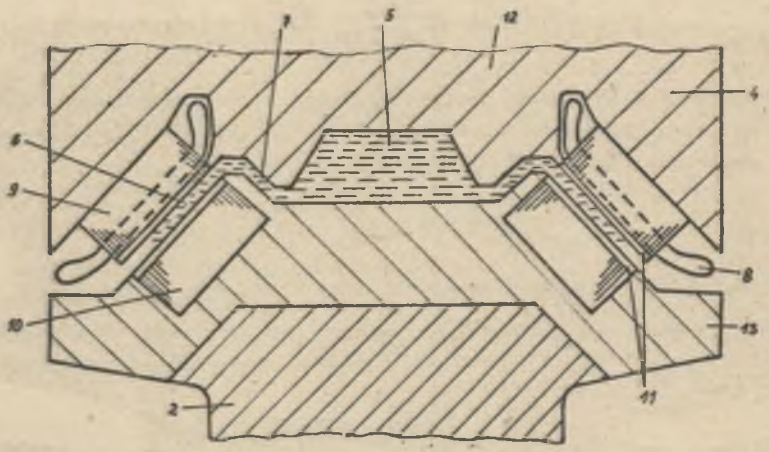
5. ROZWIĄZANIA PATENTOWE ZBIERACZY PRĄDOWYCH Z CIEKŁEGO METALU

Istnieje znaczna ilość opisów patentowych, dotyczących zarówno konstrukcji jak i ulepszeń zapewniających poprawną pracę węzła stykowego [13], [14], [15], [16].

Szereg rozwiązań dotyczy zminimalizowania strat hydrodynamicznych względnie strat od prądów wirowych w cieczy, gdy zbieracz pracuje w otoczeniu silnego zewnętrznego pola magnetycznego. Istnieją opatentowane konstrukcje zapewniające utrzymanie cieczy w styku we wszystkich możliwych warunkach pracy maszyny. Uzyskuje się to np. przez hermetyzację styku drogą elektromagnetyczną, przez wprowadzenie w obszary sąsiadujące ze strefą roboczą styku wzbudników, wytwarzających pole magnetyczne zapobiegające wypływowi cieczy. Częstymi przedmiotami patentów są zbieracze prądowe z ciekłego metalu wyposażone w szczotkę monolitową lub w postaci plecionki, zanurzonej w ciekłym metalu. Pojedyncze opisy patentowe dotyczą rozwiązań konstrukcyjnych zbieraczy strugowych, rolkowych, względnie obwodów pomoc-

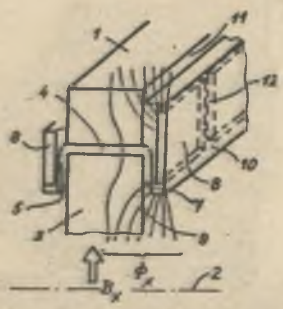
niczych, jak np. oczyszczania ciekłego metalu, obiegu gazu obojętnego, układów schładzających itp.

W patencie [13], który może być wykorzystany dla silnika unipolarnego pracującego przy zmiennym kierunku i prędkości wirowania, zaproponowano hermetyzację styku przy wykorzystaniu pola magnetycznego. W tym celu (rysunek 6) w obszarze poza głównym węzłem stykowym (5) umieszczono w pakie-



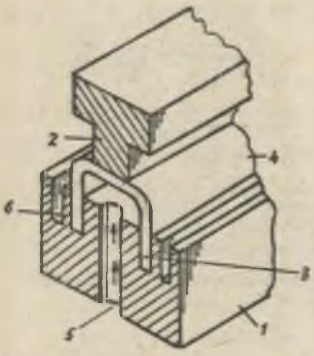
Rys. 6. Zbieracz prądowy z ciekłego metalu z hermetyzowaną strefą stykową

cie blach (9), (10) w części ruchomej (2), jak i nieruchomej (4) zbieracza, wielofazowe uzwojenie (8) wytwarzające wirujące pole magnetyczne. Pole to indukuje w warstwie metalu wypełniającego szczelinę boczną (6) prądy elektryczne, w wyniku czego ciekły metal dopływający ze szczeliny (7) przechodzi w stan wirowania, zapewniając hermetyzację styku. Dowolny stopień hermetyzacji osiąga się przez zmianę częstotliwości zasilania wzbudnika. Dla zmniejszenia strat tarcia a także dla ochrony pakietu blach i uzwojenia od działania agresywnego ciekłego metalu, przewidziano pokrycie powierzchni bocznych specjalną powłoką (11).



Rys. 7. Zbieracz prądowy z ciekłego metalu w specjalnym wykonaniu ograniczającym straty od prądów wirowych

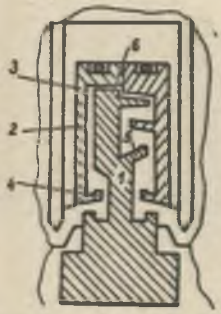
Dla zmniejszenia strat magnetohydrodynamicznych wynikłych z obecności promieniowej składowej indukcji pola zewnętrznego, zaproponowano rozwiązanie przedstawione na rys. 7 [14]. Straty te można znacznie zmniejszyć przez stworzenie bocznika magnetycznego dla strumienia Φ_x. Osiąga się to przez wsta-



Rys. 8. Zbieracz prądowy typu szczotkowego smarowany ciekłym metalem

wienią blaszek ferromagnetycznych (8) na boczne powierzchnie łącza prądowego, w które wchodzi strumień magnetyczny, omijając szczelinę między elektrodami.

Do ciekawszych rozwiązań konstrukcyjnych zbieraczy prądowych zaliczyć należy układy, w których ciekły metal współpracuje w styku ze szczotkami monolitowymi względnie plecionymi. W opatentowanym zbieraczu prądowym [15] (rys. 8), styk elektryczny między wirującą elektrodą (1) a nieruchomą (2) osiąga się przez szczotkę (3) i cienką warstwę ciekłego metalu, który wchodzi do szczeliny stykowej z kanału (5) przez otwór (6). Docisk szczotki do nieruchomej części zbieracza osiąga się działaniem siły odśrodkowej.



Rys. 9. Zbieracz prądowy z ciekłego metalu o specjalnym ukształtowaniu elektrod

W patencie [16] dla lepszego zapełnienia strefy stykowej (rys. 9) ciekłym metalem, elektrody: wirująca (1) i nieruchoma (3) wykonane są niesymetrycznie względem osi obrotu. Między elektrodami utworzona jest pierścieniowata szczelina (2) o grubości 1 mm, dzięki czemu metal ciekły szybciej jak przy szerokiej szczelinie osiągnie strefę styku (6). Występy (4), (5) służą jako zbiorniki ciekłego metalu, który gromadzi się w nich, gdy wirnik osiągnie zerową prędkość obrotową. Podtrzymanie ciekłego metalu w strefie styku można zrealizować przez wywarcie w tym obszarze nadciśnienia gazu ochronnego.

LITERATURA

[1] Biertinov A.I., Alievskij B.L., Troickij S.R.: Unipoljarnyje električeskie mašiny. Izd. Energija 1966 r.

[2] Eriksson J.T.: Design aspects on superconducting do motor using a new method of liquid metal current collection. Sähkö, Nr 7/8, 1976 r.

[3] Glazkov Ju., Moskvičeva V.N., Parm O.A. i inni: Eskperimentalnoje issledovania i rasčet hydrodynamičeskich poter pri dviženii židkosti v kolcevom kanale cylindričeskich vraščajuščichsja teł. Sbornik Nauč. Tr. Niskotemp. Ochlažd. Elektr. Generat. Novosybirsk 1978 r.

[4] Johnson J.L., Hummert G.T. Kaston A.R.: Liquid metal current collectors for homopolar machines. IEEE Trans. on PAS, vol. 95, Nr 4, 1976 r.

[5] Klimovič A.E., Lokšin D.V., Perelštein G.N.: Električeskie poteri v židkometaličeskich skolzjaščych kontaktach unipoljarnych mašin. Elektrotechnik Nr 4, 1969 r.

[6] Lysov N.E., Godžello A.G., Meikson V.G. i inni: Soprotivlenije židkometaličeskich kontaktov. Elektrotechnika, Nr 1, 1969 r.

[7] Maszyna unipolarna z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia - (rozeznanie problemu, wytyczne do projektu) cz. I, cz. II. Prace naukowo-badawcze Inst. Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Pol. Śląskiej w Gliwicach, 1974 r.

[8] Novickij V.G.: Optimalizacja židkometaličeskogo kontakta sverprovodnikovoj unipoljarnoj mašiny po minimum magnetohydrodinamičeskich poter. Sborn. Električ. Mašiny, Sverchprovodn. Generatory, 1979 r.

[9] Novickij V.G. Potery v židkometaličeskom kontakte meždy plaskimi plastinami. Sbornik Električ. Mašiny, Sverchrpovodn. Generatory,1979 r.

[10] Suchanov L.A.: Analiz ustičivosti položenija židkosti v kolcevom tokosjemnom ustrojstvie unipoljarnoj mašiny pri tokovoj peregruzke.Električ.Mašiny, Issledov. Voprosy Teorii Rasčet. 1965 r.

[11] Suchanov L.A., Bobikov Ju.A., Safiulina R.Ch.: Tokosjemnyje ustrojstvo s židkometaličeskim kontaktom dlja unipoljarnych mašin.Električ. Masiny Issledov.Vopr.Teor.Rasč. Leningrad, 1965 r.

[12] Suchanov L.A., Bobikov Ju.A., Safiullina R.Ch. Rasčet židkometaličeskogo toksjema unipoljarnych mašin. Elektrotechnika, Nr 6, 1965 r.

[13] Massar Ernst: Patent RFN nr 2433469.

[14] Massar Ernst: Patent RFN nr 2717792.

[15] Marschall R.A.: Patent USA nr 4186321,

[16] Hatch B.: Patent USA nr 4168445.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji 5.IV.1982 r.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ИЗ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИНАХ

Р е з ю м е

Представлены основные конструкционно-расчетные проблемы относящиеся к токосъемным устройствам из жидкого металла употребляемым в сверхпроводящих униполяторных машинах.

Даны зависимости для расчета потерь в жидком металле и условия устойчивости работы токосъемного устройства.

В статье обсуждены более интересные патентные решения.

TECHNICAL PROBLEMS ON CONSTRUCTION AND PERFORMANCE OF LIQUID METAL CURRENT COLLECTORS FOR HOMOPOLAR SUPERCONDUCTING MACHINES

S u m m a r y

The main constructional problems concerning studies of liquid metal current collectors for superconducting homopolar machines are presented.

Expression for power losses in liquid metal and conditions for stable operation of the liquid metal in the collector are discussed.

A new patent specifications of current collectors are presented.