

prof. dr inż. ANDRZEJ KORDECKI

Instytut Układów Elektromaszynowych

Politechniki Wrocławskiej

Wrocław

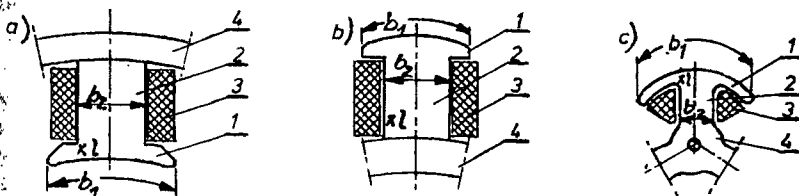
PROSZKOWE STRUKTURY KONCENTRATORÓW INDUKCJI MAGNETYCZNEJ TWORNIKÓW MIKROMASZYN I MASZYN MOCY UŁAMKOWEJ PRĄDU STAŁEGO

Przedstawiono zasady działania litych, przestrzennych, dysypatywnych koncentratorów indukcji magnetycznej tworników litych i blachowych. Podano systematykę i specyfikę struktur konstrukcyjnych koncentratorów i ich możliwości zastosowania do tworników maszyn prądu stałego.

1. Wstęp

Zasada koncentracji indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach magnetowodów jest od dawna znana i stosowana zarówno w maszynach dużych, jak też w mikromaszynach. Typowymi przykładami magnetowodów, w których występuje koncentracja indukcji, a więc spełniających funkcje koncentratorów indukcji, są: biegun maszyny prądu stałego (rys. 1a) lub przemiennego (rys. 1b) oraz ząb twornika trójątkowego maszyny prądu stałego (rys. 1c). Z rysunku 1 widać, że kształty tych magnetowodów są prawie analogiczne. Przyjmijmy wstępnie, w celu uproszczenia rozważań, że wymienione magnetowody są blachowe, a więc ich długości w kierunku maszyny są jednakowe w każdym punkcie ich obrysu czyli $l_1 = l_2 = l$. W rozważanych przykładach częścią magnetowodu, do której będziemy odnosić koncentrację indukcji, jest część uzwojona; w naszym przypadku pieńek bieguna lub trzon zęba (rys. 1 a, b, 2). Założymy jeszcze, że magnetowód jest niedysypatywny, gdyż strumień rozproszony $\Phi_s = 0$, a zatem strumień Φ_1 części 1 magnetowodu wg rys. 1a-c równa się strumieniowi Φ_2 części 2, czyli $\Phi_1 = \Phi_2$ lub $B_1 l_1 b_1 = B_2 l_2 b_2$, a wobec równości $l_1 = l_2$ indukcja skoncentrowana

$$B_2 = B_1 \frac{b_1}{b_2} \quad /1/$$



Rys. 1. Magnetowody blachowe: a) biegun główny maszyny prądu stałego, b) biegun maszyny synchronicznej, c) twornik trójątkowy maszyny prądu stałego, 1 – nabiegunknik bieguna lub głowica zęba, 2 – pieńek bieguna lub trzon zęba, 3 – uzwojenie, 4 – jarzmo magnetyczne lub rdzeń twornika.

Przyjmując założenie, że zawsze $B_2 > B_1$ jako indukcja skoncentrowana, to z /1/ wynika, że również zawsze musi być

$$b_1 > b_2$$

/2/

Nierówność /2/ jest podstawowym warunkiem koncentratora blachowego płaskiego, niedyssypatywnego.

W części 2 magnetowodu indukcję koncentruje się aby:

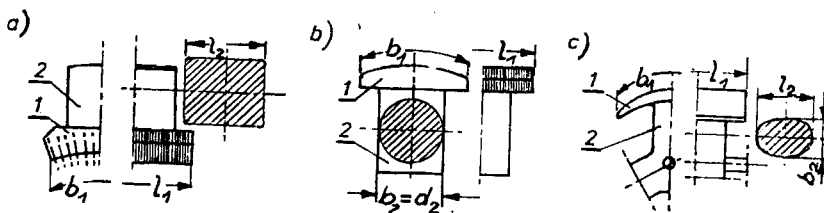
- zmieścić na sąsiadujących magnetowodach (bieguny, zęby) potrzebną ilość uzwojenia,
- zmniejszyć średnią długość zwoju uzwojenia, a przez to jego masę i koszt, a także rezystancję i straty w miedzi,
- zmniejszyć indukcję w szczelinie przytwornikowej dla określonej indukcji w trzonie zęba; dotyczy to zwłaszcza maszyn o magnesach trwałych.

Cel drugi i trzeci przyjmujemy w tym artykule za podstawowy.

2. Warunki geometryczno-materiałowe

W maszynach wirujących walcowych typowym kształtem pola przekroju uzwojonej części magnetowodu blachowego jest prostokąt. Najmniejszą średnią długość zwoju uzyskuje się wtedy, gdy zwojona część magnetowodu ma przekrój zbliżony do kwadratu. Dla cewek biegunów i trójkątkowych tworników jest on dokładnie kwadratem, natomiast dla cewek twornika o żłobkach $Z > 3$ jest to uzyskany z rozwinięcia prostokąt, którego długość l_2 jest niewiele większa od długości łuku $\hat{l}_2$, odpowiadającej rozpiętości cewki. Nie jest możliwe równoczesne uzyskanie praktycznie kwadratowych przekrojów magnetowodów zwojonych tworników i pierków biegunów magnetycznych. Wynika to ze specyfiki blachowej struktury magnetowodu.

Gdy jednak przyjmie się założenie konstrukcyjne, że zarówno dla biegunów jak i twornika $l_1 \neq l_2$, to wtedy uzyska się dla obu rodzajów magnetowodów przekroje części zwojonych różne od prostokątnych. Wymaga to jednak całkowitego lub częściowego zastosowania materiałów litych, w których linie indukcji mogą być krzywymi przestrzennymi. Rysunki 2a, b, c, przedstawiają struktury konstrukcyjne odpowiednio zmienionych magnetowodów z rys. 1a, b, c, umożliwiających uzyskanie kwadratowych, owalnych lub kołowych pól przekrojów zwojonych części magnetowodów.



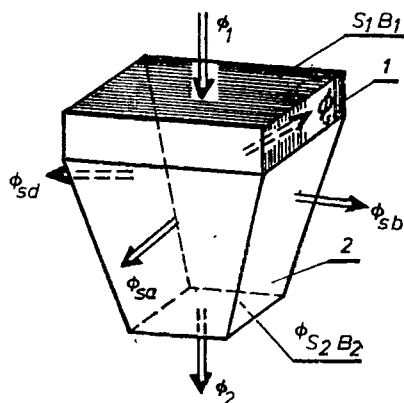
Rys. 2. Magnetowody blachowo-lite: a) biegun główny maszyny prądu stałego, b) biegun maszyny synchronicznej, c) twornik trójkątkowy maszyny prądu stałego, 1 – blachowy nabiegownik bieguna lub lita głowica zęba, 2 – lity pień bieguna lub lity trzon zęba twornika

3. Zasady działania koncentratorów indukcji przestrzennych, dyssypatywnych

Z porównania koncentratorów przedstawionych na rysunkach 1a, b, c oraz 2a, b, c można wysunąć następujące podstawowe spostrzeżenia:

1. Na rysunkach 1a, b, c są pokazane koncentratory płaskie, dla których $l_1 = l_2$, natomiast na rys. 2a, b, c — przestrzenne, gdyż $l_1 \neq l_2$; nierówność ta jest cechą koncentratorów przestrzennych.
2. Koncentrator przestrzenny może być magnetowodem w postaci elementu pojedynczego czyli jednego elementu (rys. 2c) lub kilku stanowiących element złożony lub częściej podzespół (rys. 1a oraz b). Możemy zatem, zależnie od celowości i możliwości, budować przestrzenne koncentratory pojedyncze i złożone.
3. Przestrzenny koncentrator indukcji musi być budowany z materiałów i tworzyw uwarunkowanych charakterem strumienia magnetycznego, czyli jego zmiennością w czasie. Strumienie niezmiennie lub wolnozmiennie w czasie dopuszczają zastosowanie materiałów i tworzyw litych: staliwa, stali walcowanej i kutej oraz spieków proszku żelaza. Natomiast strumienie szybkozmiennie wymagają struktur blachowych lub proszkowych, umożliwiających opanowanie strat mocy z przemagnesowania, np. dielektromagnetyków lub spieków specjalnych [2], [3].

Posługując się abstrakcyjnym modelem (rys. 3), przedstawimy zasadę działania i warunki koncentracji indukcji przestrzennego koncentratora dyssypatywnego. Jest to model koncentratora dla strumienia przemiennego, złożony z dwóch elementów: pakietu blach 1 i trzonu 2 wykonanego z proszku żelaza w postaci dielektromagnetyku, przy czym pakiet blach jest np. sklejny ze sobą i z trzonem.



Rys. 3. Model dyssypatywnego, przestrzennego koncentratora strumienia przemiennego, 1 — nasada koncentratora blachowa, 2 — trzon lity z dielektromagnetyku

Zakładamy, że strumień rozproszony

$$\Phi_s = \sum_{i=a}^{i=d} \Phi_{si} > 0 \quad /3/$$

przy czym $i = a, b, c, d$.

Z ciągłości strumienia wynika

$$\Phi_2 = \Phi_1 - \Phi_s \quad /4/$$

lub

$$B_2 S_2 = B_1 S_1 - \Phi_s \quad /4a/$$

Stopień koncentracji definiujemy jako

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{B_2}{B_1} \quad /5/$$

a z uwzględnieniem /4a/

$$k = \frac{S_1}{S_2} - \frac{\Phi_s}{B_1 S_2} \quad /6/$$

Jest to podstawowy wzór stopnia koncentracji indukcji koncentratora przestrzennego, dyssypatywnego. Nierówność

$$\frac{S_1}{S_2} > 1 \quad /7/$$

czyli

$$S_1 > S_2 \quad /7a/$$

jest podstawowym warunkiem koncentracji indukcji koncentratora przestrzennego, analogicznie jak $\frac{b_1}{b_2} > 1$ – wg /2/ – koncentratora płaskiego.

Ponieważ dla koncentratora dyssypatywnego /3/ $\Phi_s > 0$, to zgodnie z /6/ i przy założeniu, że koncentracja zachodzi tylko wtedy, gdy

$$k > 1 \quad /8/$$

musi być spełniona nierówność

$$\Phi_s < \Phi_1 - B_1 S_2, \quad /9/$$

wynikająca z uwzględnienia /7/, /8/ oraz równości $\Phi_1 = B_1 S_1$.

Dla pomijalnie małej wartości $\Phi_s \approx 0$, czyli dla koncentratora praktycznie niedyssypatywnego, stopień koncentracji, zgodnie z /6/, wynosi

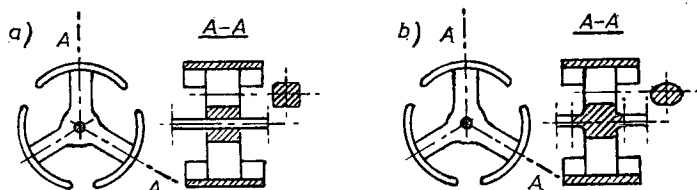
$$k = \frac{S_1}{S_2} \quad /10/$$

4. Magnetowód twornika żłobkowego o postaci elementu pojedynczego z kompozytu proszkowego

Za modelową strukturę magnetowodu twornika żłobkowego o przestrzennym koncentratorze indukcji magnetycznej, jako elementu pojedynczego, można uznać twornik o trzech żłobkach (rys. 2c) wykonany z kompozytu proszkowego, którym może być dielektromagnetyk lub specjalny spiek niskostanny.

Magnetowód twornika trójąłobkowego może mieć trzony zębów o przekrojach: kwadratowych (rys.4a), prostokątnych, owalnych (rys.4b) lub okrągłych, natomiast zasadniczym kształtem głowic zę-

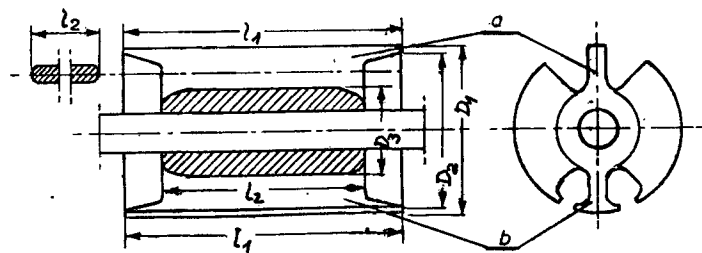
bów są rozwijalne na prostokąt wycinki cylindra. Magnetowód twornika z dielektromagnetyku (rys. 4a) musi być osadzony na wale jako oddzielnym elemencie. Natomiast magnetowód twornika (rys. 4b) ze spieku specjalnego, małostratnego [3] może tworzyć z wałem jeden element: wał musi być dodatkowo szlifowany po spieczeniu.



Rys. 4. Magnetowody trójkątowych tworników: a) z magnetodielektryku zaprasowanego na oddzielnym wale, b) ze spieku wyprasowanego i spieczonego z wałem jako jeden element.

Magnetowód twornika wielożłobkowego o $Z > 3$ wykonany z magnetodielektryku osadza się na wale jako oddzielnym elemencie (rys. 5), przy czym głowice zębów są dłuższe od trzonów zębów, czyli $l_1 > l_2$. Magnetowód wg. rys. 5a ma żłobki otwarte ($b_1 = b_2$), natomiast wg. rys. 5b — żłobki przymknięte ($b_1 > b_2$). W obu przypadkach zasadniczym kształtem pola przekroju trzonów zębów jest prostokąt zaokrąglony z obu stron. Również dna żłobków u swych wylotów są zaokrąglone. Zapewnia to nałożenie jednakowo grubej warstwy fluidyzacji, jeżeli ma ona spełniać funkcję izolacji głównej. Nawinięte na magnetowodzie uzwojenie nie wymaga ani klinowania lub kitowania żłobków, ani sznurowania połączeń czołowych, gdyż przytrzymują je z obu stron wysięgi głowic zębów o długości

$$w_1 = \frac{(l_1 - l_2)}{2}$$



Rys. 5. Wielożłobkowy magnetowód twornika z dielektromagnetyku: a — żłobki otwarte, b — żłobki przymknięte

5. Magnetowody tworników żłobkowych o postaci elementów złożonych oraz podzespołów

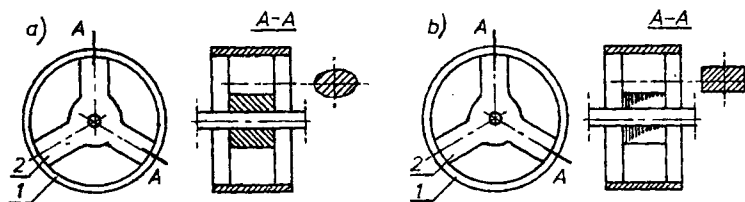
Magnetowody te składają się z dwóch rodzajów elementów:

- ☐ litych koncentratorów o kształcie: rur, kołpaków, klinów łopatkowych, wieloklinów grzebykowych, wieloklinów kołpakowych i innych, wykonanych z dielektromagnetyków;
- ☐ litego (kompozyt) lub blachowego rdzenia użłobkowanego, traktowanego jako jeden element pojedynczy (kompozyt) lub złożony (blachy).

5.1. Magnetowody o koncentratorach rurowych: pojedynczych i członowych

Koncentraty rurowe wykonuje się z dielektromagnetyku izotropowego lub lepiej anizotropowego. Spełniają one funkcję głowic zębów zamykających magnetycznie i mechanicznie otwarte żłobki magnetowodu twornika.

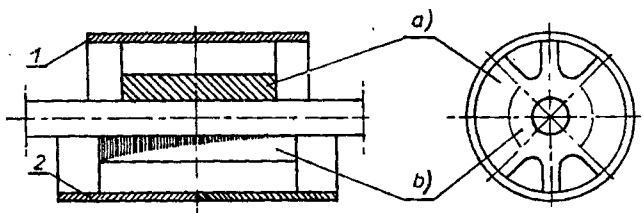
Tróźłobkowy magnetowód twornika ma pojedynczy koncentrator rurowy (rys. 5). Zęby wykonane z kompozytu proszkowego (rys. 6a) mogą mieć optymalne przekroje, natomiast z blach — wyłącznie prostokątne (rys. 6b).



Rys. 6. Magnetowody tróźłobkowych tworników jako elementy złożone o rdzeniach: a) z kompozytu proszkowego, b) z blach, 1 — koncentrator rurowy, 2 — zębiony rdzeń twornika

Wieloźłobkowy magnetowód twornika o $Z > 3$ może mieć koncentrator pojedynczy dla maszyn krótkich (rys. 7a), natomiast dla maszyn dłuższych — ze względów technologicznych — koncentrator członowy, dwuelementowy (rys. 7b, 2). Przekroje zębów litych są prostokątne, na końcach wyokrąglone tak, jak dla magnetowodu wg rys. 5a.

Koncentraty rurowe można stosować również do tworników bezźłobkowych.

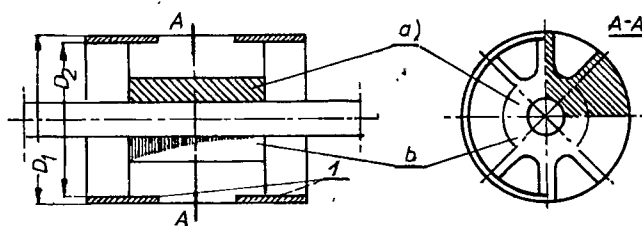


Rys. 7. Magnetowody wieloźłobkowych tworników jako elementy złożone o zębionych rdzeniach wykonane z: a) kompozytów proszkowych, b) blach, 1 — koncentrator rurowy pojedynczy, 2 — koncentrator członowy, dwuelementowy

5.2. Magnetowody o koncentratorach kołpakowych

Koncentrator kołpakowy jest w swej istocie skróconym członem koncentratora rurowo-członowego, nasuwany na każdą skrajną część twornika. Wymaga to zębionego rdzenia twornika o dwóch różnych średnicach odpowiadających zewnętrznej (D_1) i wewnętrznej (D_2) średnicy kołpaka (rys. 8).

Dla twornika blachowego trzeba zastosować dwa rodzaje wykrojów blach. Żłobki twornika w części środkowej — zarówno w odmianie litej, jak i blachowej — mogą być przymknięte lub otwarte, natomiast wyłącznie otwarte w częściach skrajnych, na których są osadzone kołpaki.

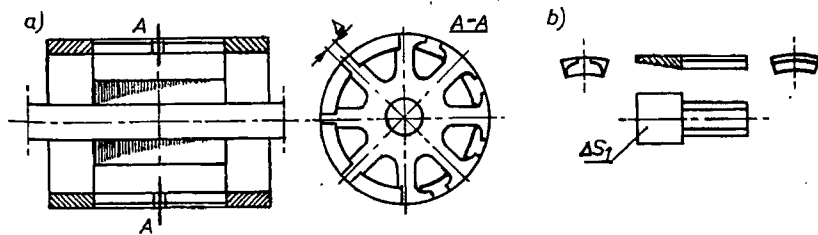


Rys. 8. Magnetowody tworników wielozębnych: a) proszkowych, b) blachowych, 1 — koncentratory kołpakowe

5.3. Magnetowody o koncentratorach w postaci klinów łopatkowych oraz wieloklinów grzebykowych i kołpakowych

Celowe jest stosowanie koncentratorów klinowych i wieloklinowych przede wszystkim do magnetowodów tworników blachowych; można je też wykorzystać do magnetowodów proszkowych jako strukturę nietypową, lecz w pewnych przypadkach technologiczną. Koncentratory te wykonuje się z dielektrycznego izotropowego. Wymagają one przymkniętych zębów twornika ze względów magnetycznych i mechanicznych. Zębki klinuje się z obu stron twornika (rys. 9a, 10a, 11a). Dlatego długość zębów klinu wynosi powyżej połowy długości rdzenia twornika.

W klinie łopatkowym zewnętrzny pozazębkowy koniec, odpowiadający wysięgowi połączeń czołowych (rys. 9a) uzwojenia twornika ma kształt łopatki (rys. 9b), stanowiącej zasadniczo wycinek kołpaka (rys. 8). Powierzchnia łopatki ΔS_1 jest częścią powierzchni S_1 koncentratora (rys. 3), której odpowiada strumień $\Delta \Phi_1$ będący częścią strumienia Φ_1 ; klin wprowadza strumień $\Delta \Phi_1$ do sąsiadujących zębów, powodując w nich koncentrację indukcji. Montowanie klinów łopatkowych wymaga dokładności. Zewnętrzne powierzchnie łopatek muszą tworzyć powierzchnię walcową (rys. 9a) i nie mogą być przekręcone, gdyż grozi to zatarciem o bieguny.

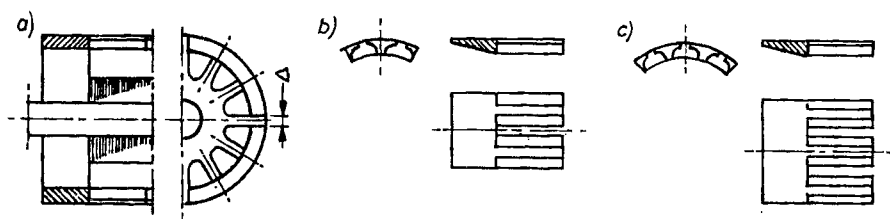


Rys. 9. Blachowy magnetowód twornika wielozębny: a) o koncentratorach klinowych łopatkowych, b) klin łopatkowy

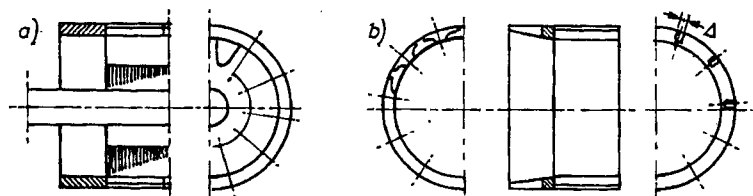
Wieloklin grzebykowy (rys. 10a, b, c) nie ma tej wady. Można go jednak stosować wyłącznie w tym przypadku, gdy liczba zębów Z twornika ma przynajmniej jeden dzielnik W , przy czym $Z > W > 1$. Na przykład dla twornika o $Z = 12$ jeden wieloklin grzebykowy może mieć 2 (rys. 10b), 3, 4 lub 6 klinów (rys. 10c). Ze względu na technologię najkorzystniejsze są wielokliny dwuklinowe, które ponadto łatwo jest montować.

Wieloklin kołpakowy (rys. 11a, b), w przeciwieństwie do wieloklinu grzebykowego, można stosować

do tworników o dowolnej liczbie żłobków Z . Jest to element wykonany z dielektromagnetyku, łatwo montowany, lecz kłopotliwy technologicznie.



Rys. 10. Blachowy magnetowód twornika dwunastożłobkowego, a) o koncentratorze wieloklinowych grzebykowych, b) wieloklin grzebykowy dwuklinowy, c) wieloklin trójklinowy



Rys. 11. Blachowy magnetowód twornika jedenastożłobkowego: a) o koncentratorze wieloklinowym kołpakowym, b) wieloklin kołpakowy jedenastoklinowy

Przedstawione schematycznie typy koncentratorów klinowych i wieloklinowych, a w zasadzie wszystkich omówionych koncentratorów, wymagają spełnienia kilku podstawowych warunków dla ich prawidłowego działania, a przede wszystkim:

- powstawania minimalnych strumieni rozproszonych Φ_s ,
- nie występowania przesyceń indukcji w przekrojach poszczególnych części koncentratorów,
- zastosowania, w miarę możliwości, anizotropowych dielektromagnetyków.

W celu zmniejszenia strumienia rozproszonego Φ_s wzdłuż obwodu twornika /3/ prostokątne przekroje podłużne łopatek (rys. 9a), grzebyków (rys. 10a) i kołpaków (rys. 11a) można zastąpić trapezowymi (rys. 9b, 10b, 11b); ponadto między łopatkami (rys. 9a) i grzebykami (rys. 10a) należy pozostawić właściwy odstęp Δ , a kołpak wieloklinu warto zaopatrzyć w napięcia w kierunku osiowym również w szerokości Δ (rys. 11c).

Każdy koncentrator ma swoje przekroje, które są podatne na powstawanie w nich przesyceń. W takich przekrojach są blokowane strumienie częściowe $\Delta\Phi_1$ przenikające do strumienia Φ_2 . Przekrój swoisty występuje np. w klinie łopatkowym na granicy łopatki i żłobkowej części klina.

Skuteczność koncentrowania indukcji może być zwiększona przez zastosowanie na koncentratory dielektromagnetyków o specjalnie wytworzonej anizotropii przenikalności magnetycznej. Powinna ona mieć dużą wartość wzdłuż torów koncentrowanych strumieni, natomiast małą wzdłuż toru strumienia rozproszonego. Anizotropia taka jest możliwa [1], [2], [3], lecz stanowi oddzielne, specjalne zagadnienie.

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych rozważań można stwierdzić, że zasady stosowania przestrzennej koncentracji indukcji w magnetowodach twornika umożliwiają:

- zmniejszenie ilości miedzi nawojowej, oporowych strat mocy dla określonych wartości I i D twornika oraz indukcji B_g ,
- zastosowanie magnesów trwałych o niższej indukcji B_r , a tym samym mniejszej wartości B_g ; magnesy te oraz magnetowód twornika muszą być jednak w tym przypadku dłuższe w kierunku osi maszyny, lecz dzięki zastosowaniu koncentratorów nie powoduje to wydłużenia całego twornika łącznie z wysięgiem połączeń czołowych.

Artykuł ma charakter koncepcyjny. Autor w chwili zakończenia jego pisania dysponuje jedynie fragmentarycznymi wynikami badań doświadczalnych, które nie upoważniają do wysnuwania wniosków liczbowych. Mimo tego niedostatku autor jest zdania, że z kilku powodów nie należało czekać do czasu skompletowania wyników. Zasadniczym powodem jest potrzeba minimalizowania mikromaszyn wyposażonych aktualnie w magnesy trwałe o niezadowalających do tego celu parametrach magnetycznych. Stosując jednak koncentratory indukcji magnetycznej, stwarza się szansę wykonania maszyn o małych rozmiarach z wykorzystaniem do ich budowy nawet takich magnesów.

Literatura

- [1] Gardeła K., Kordecki A.: Magnetodielektryczne elementy zamykające żłobki magnetowodów maszyn elektrycznych. IV Sympozjum Metalurgii Proszków, Łańcut 1978.
- [2] Kordecki. A.: Właściwości magnetowodów z magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych mikromaszyn elektrycznych. II Sympozjum nt. Mikromaszyny i Serwonapędy, Sosnowiec 1980.
- [3] Węgliński B.: Magnetycznie miękkie kompozyty proszkowe na osnowie żelaza. Pr.Nauk. Inst.Ukł. El. Pol.Wr., 1981.