

środkiem nabiegunnika, przez co wpływ uzębienia twornika na przewodność zębka jest mniejszy.

Gdy siła komutacji nie przekracza 3 woltów maszyna może pracować bez przesuniętych szczotek, nie licząc niewielkiego przesunięcia spowodowanego reakcją twornika.

3. Bieguny zwrotne.

W miarę wzrostu obciążenia prądnic musimy coraz więcej przesuwac szczotki w kierunku ruchu, aby zmniejszyć iskrzenie na komutatorze.

Przesuwanie szczotek ze zmianą obciążenia jest wysoce niedogodne lub wprost niemożliwe, szczególnie w maszynach podlegających nagłym i znacznym zmianom obciążenia lub w maszynach repulsyjnych, gdzie szczotek wogóle przesuwac nie można. Oprócz tego, jak wiemy, poprawienie komutacji, przez przesuwanie szczotek, nie jest dostateczne ze względu na ujemny wpływ reakcji twornika, następnie wskutek nieodpowiedniego rozkładu pola kompensującego w strefie obojętnej.

Najlepszym i najwięcej używanym obecnie sposobem poprawienia warunków komutacji, bez potrzeby przesuwania szczotek, jest stosowanie t.zw. b i e g u n ó w z w r o t n y c h.

Zadaniem biegunów zwrotnych jest wytworzenie w

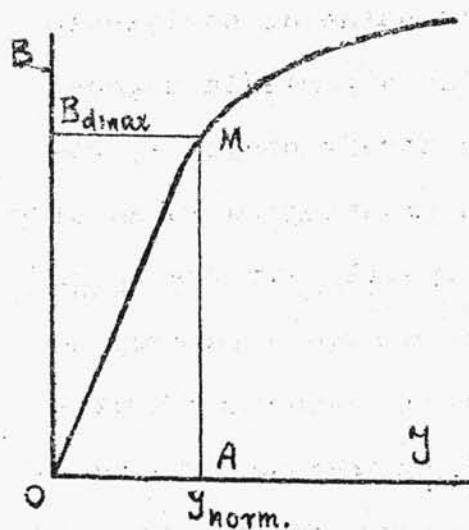
strefie obojętnej takiego pola magnetycznego, którego kierunek byłby przeciwny do kierunku strumienia, powstałego od dotakowego prądu komutacji $/i_s/$ oraz natężenie tego pola byłoby zmienne i proporcjonalne do obciążenia maszyny. Niezależnie od tego rozkład strumienia magnetycznego biegunów zwrotnych wzdłuż strefy obojętnej powinien być identyczny z odwróconym przebiegiem zmian siły komutacji zwartych zwojnic /patrz rys.116 -krzywe e_k śr/

W maszynach nieposiadających uzwojenia kompensacyjnego bieguny zwrotne, oprócz wyżej wspomnianych właściwości, powinny jeszcze kompensować poprzeczne pole reakcji twornika, które, jak wiemy, osłabia strumień biegunów głównych, a tem samem zmniejsza siłę elektromotoryczną maszyny.

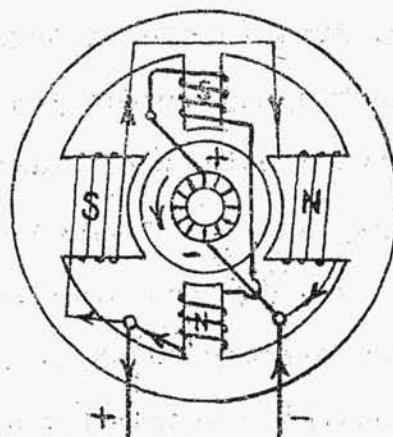
W celu wytworzenia tych warunków bieguny zwrotne umieszczamy w środku między biegunami głównymi, wzbudzamy je głównym prądem wychodzącym z maszyny /łączymy szeregowo z obwodem twornika/ i to w takich granicach /odcinek OA, rys.123/, aby, przy głównym prądzie, zmieniającym się od zera do wartości normalnej, strumień biegunów zwrotnych zmieniał się proporcjonalnie.

Dla otrzymania odpowiedniego, do zmian sił komutacji, rozkładu strumienia biegunów zwrotnych w strefie obojętnej stosujemy specjalnego kształtu nabiegunniki tych biegunów.

Na rysunku 124 mamy pokazaną dwubiegunową maszynę samowzbudną z biegunami zwrotnymi. Widoczne jest również uzwojenie wzbudzenia biegunów głównych i zwrotnych.



Rys. 123.



Rys. 124.

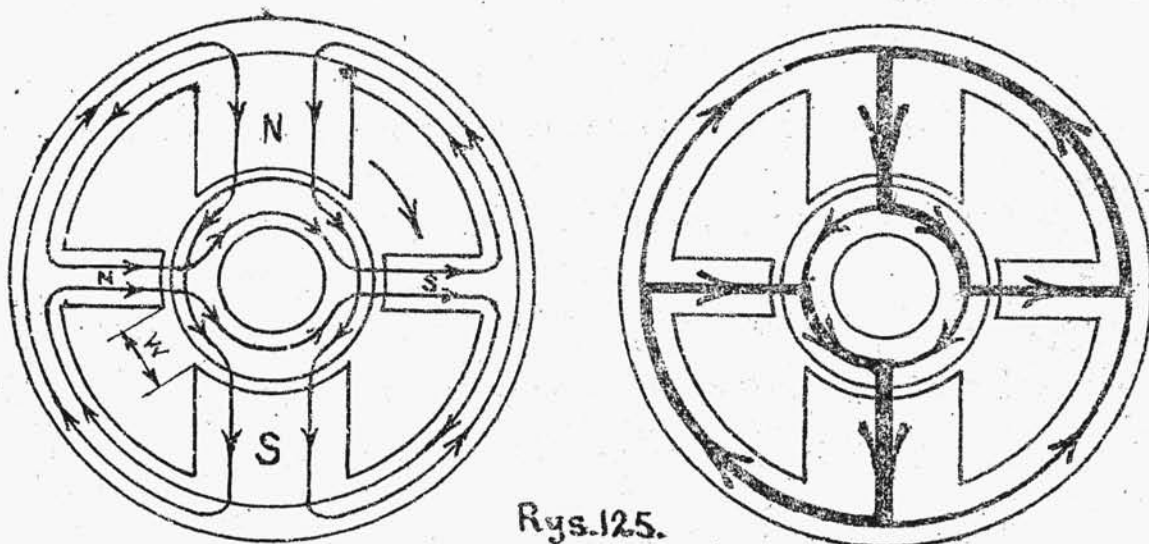
Kierunek prądu w uzwojeniu wzbudzenia biegunów zwrotnych dla prądnicy powinien być dobrany w ten sposób, aby znak bieguna zwrotnego był taki, jaki znak posiada najbliższy w kierunku ruchu biegun główny.

Ponieważ przez uzwojenie wzbudzające bieguny zwrotne przepływa całkowity prąd maszyny, zatem przekrój drutu uzwojenia musi być odpowiednim do tego prądu.

W jarzmie i rdzeniu twornika maszyny z biegunami skojarzone są dwa strumienie magnetyczne, które w pewnych częściach dodają się, a w innych odejmują się, rys. 125, tak, że przy projektowaniu maszyny należy się liczyć z tem, aby indukcja, w miejscach gdzie oba strumienie są

zgodne, nie przekraczała granicy dopuszczalnej.

Proporcjonalność strumieni powinna zachodzić nie tylko w samych biegunach zwrotnych, lecz na całej długości obwodu magnetycznego tych biegunów, a więc w jarzmie i w rdzeniu twornika. Dlatego nasycenie tych części maszyny dopuszczamy niewielkie - zwykle około 10000 gaussów.



Rys. 125.

Wartość siły komutacji, jaką skompensować musi elektromotoryczna siła wytworzona przez bieguny zwrotne, jak wiemy, wyraża się wzorem:

$$e_k = C \cdot 4 \cdot Z_s \cdot l_z \cdot v \cdot A \cdot \Delta p \cdot 10^{-8} \text{ woltów} \quad 108.$$

Siła elektromotoryczna kompensująca, wytworzona w zwartych zwojnicach skutkiem działania bieguna zwrotnego na podstawie wzoru 109 wynosi:

$$e_p = 2 \cdot B_d \cdot Z_s \cdot l_{di} \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ woltów} \quad 111.$$

gdzie B_d - indukcja magnetyczna pod biegunem zwrotnym w szczelinie powietrznej, Z_s - liczba zwartych zwojów, l'_{di} - długość /osiowa/ obliczeniowa nabiegunnika bieguna zwrotnego, v - szybkość obwodowa twornika.

Dla zupełnej kompensacji konieczne jest, aby w każdej chwili okresu komutacji i w każdym miejscu pasa komutacyjnego

$$e_k = e_p$$

Podstawiając w to równanie odpowiednie wartości masy

$$C \cdot 4 \cdot Z_s \cdot l_z \cdot v \cdot \bar{A} \cdot AP \cdot 10^{-8} = 2 \cdot B_d \cdot Z_s \cdot l'_{di} \cdot v \cdot 10^{-8}$$

skąd

$$B_d = C \cdot 2 \cdot \bar{A} \cdot AP \cdot \frac{l_z}{l'_{di}} = C' J \quad ||2.$$

gdzie J - prąd wypływający z twornika maszyny, a

$$C = \frac{n_t}{n_k} + \frac{n_k - n_t}{n_k} k_1 \quad \text{przy } n_k \geq n_t$$

$$C = 1 \quad \text{przy } n_k < n_t$$

przytem wielkość $n_k - n_t$ należy brać niezaokrągloną do liczby całkowitej, jak to stosowane było wyżej, str. 212, lecz taką jaka wypadnie z wyliczenia.

Wzór ||2 jest słuszny tylko dla uzwojeń z poskokiem pełnym, nieskróconym t.zn. kiedy współczynnik skrócenia poskoku $\xi_k = 0$.

Kiedy uzwojenie ma poskok skrócony wówczas

$$B_d = C \cdot C_1 \cdot 2 \cdot \bar{A} \cdot AP \cdot \frac{l_z}{l'_{di}} \quad ||3.$$

gdzie C_1 - współczynnik uwzględniający skrócenie poskoku

i równy

$$c_1 = 1 - 0,2 \xi_K$$

przytem ξ_K należy brać zawsze dodatnie.

Spółczynnik skrócenia poskoku obliczamy ze znanego nam wzoru

$$\xi_K = \frac{1}{2} / 1 + \frac{K}{p} - y_1 /$$

gdzie K + liczba wycinków komutatora, p - liczba par biegunów, y_1 - poskok przedni.

Bieguny zwrotne powinny wytworzyć w sferze obrotnej, pole takiego kształtu i o takim natężeniu, aby siła komutacji była skompensowana nie tylko w swej wartości maksymalnej, czy średniej, ale także aby kompensacja zachodziła każdej chwilowej wartości siły komutacji.

Jak widać z wykresów, przedstawionych na rys.116, zupełna kompensacja siły komutacji, dzięki jej stopniowemu przebiegowi, nie jest możliwa.

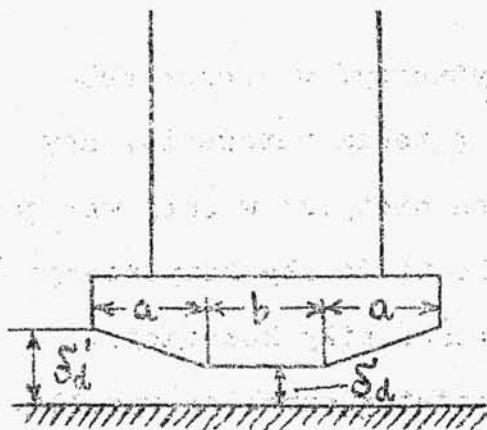
Szczególnie wielka trudność zachodzi w przypadku, gdy szczotka pokrywa niecałkowitą ilość wycinków komutatora, wówczas przebieg zmian siły komutacji zachodzi wg. krzywych zębatych. Przy projektowaniu należy szerokość szczotki dobierać w ten sposób, aby powstające siły komutacji nie zmieniały się wg. krzywych zębatych, lecz stopniowanych.

Z wykresów, przedstawionych na rys.116, widzimy, że indukcja magnetyczna pod środkiem bieguna zwrotnego

powinna być większa niż pod krawędziami. Aby to osiągnąć nabiegunniki biegunów zwrotnych muszą mieć odpowiedni kształt.

Jedną z częściej stosowanych form nabiegunników widzimy na rys. 126.

Przy tej formie nabiegunnika $\alpha = b$ i $\delta'_d = 2\delta_d$



Rys. 126.

W celu dokładniejszego określenia kształtu nabiegunnika w każdym przypadku należy budować krzywe zmienności siły komutacji i według tych krzywych dobrać kształt nabiegunnika bieguna zwrotnego.

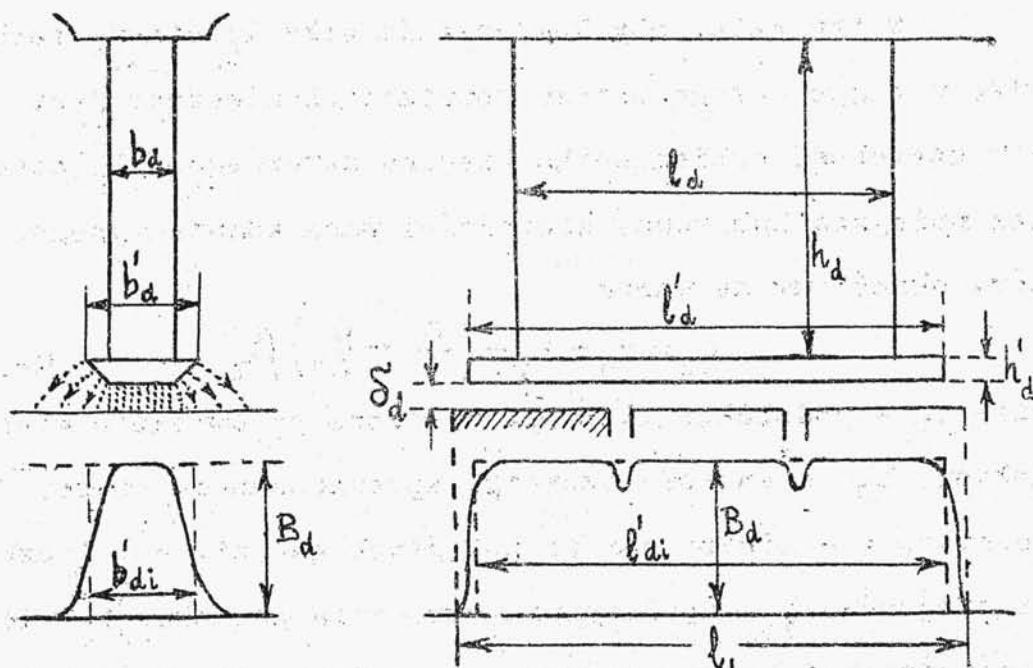
Określenie wymiarów bieguna zwrotnego.

Bieguny zwrotne mogą być z nabiegunnikami lub bez nich zależnie od konstrukcji maszyny i wymaganych warunków.

Podobnie jak przy obliczaniu biegunów głównych, wprowadzimy i w tym przypadku pojęcie idealnych /obliczeniowych/ wymiarów nabiegunnika bieguna zwrotnego.

Na rys. 127 pokazany jest przebieg indukcji

magnetycznej $/B_d/$ w szczelinie powietrznej pod biegunem zwrotnym.



Rys. 127.

Po splanimetrowaniu pól ograniczonych krzywą B_d wzdłuż obwodu i wzdłuż osi twornika budujemy równoważne prostokąty o wysokościach B_d , wówczas wymiar b'_{di} - stanowi obliczeniową szerokość, a wymiar l'_{di} - obliczeniową długość nabiegunka bieguna **zwrotnego**.

Często przy obliczeniach przyjmujemy wymiary obliczeniowe równe wymiarom rzeczywistym, czyli

$$b'_{di} = b'_d$$

$$l'_{di} = l'_d$$

Gdy szczelina powietrzna pod całą szerokością nabiegunka jest jednakowa, wówczas możemy przyjmować:

$$b'_{di} = b'_d + 3\delta$$

$$l'_{di} = l'_d + 3\delta$$

W tym celu, aby kompensacja siły komutacji zachodziła w ciągu całego okresu komutacji, koniecznem jest, żeby szerokość nabiegunnika bieguna zwrotnego była cokolwiek mniejsza lub równa szerokości pasa komutacyjnego, którą określamy ze wzoru

$$g_k = t_1 + b_D - \left(\frac{a}{p} - \xi_k \right) \beta_D \quad 114.$$

gdzie t_1 - podziałka żłobkowa mierzona po obwodzie wierzchołków, b_D - szerokość szczotki sprowadzona do obwodu twornika, a - liczba par równoległych gałęzi, p - liczba par biegunów, ξ_k - współczynnik skrócenia poskoku, β_D - wielkość podziałki komutatorowej, sprowadzona do obwodu twornika.

Zatem

$$b'_d = g_k$$

Przy wyznaczaniu szerokości nabiegunnika bieguna zwrotnego należy tylko pamiętać, aby szerokość ta była większa od maksymalnej podziałki żłobkowej, gdyż w przeciwnym razie otrzymujemy zbyt silną pulsację pola w nabiegunniku i szczelinie, co ujemnie wpływa na komutację. Praktycznie szerokość nabiegunnika można przyjmować:

$$b'_d = / 1,1 - 1,5 / t_1$$

Z drugiej strony szerokość nabiegunnika bieguna zwrotnego powinna być tak dobrana, rys. 125, aby odległość

między nabiegunkami biegunów głównego i zwrotnego wynosiła

$$w = \frac{1}{3} - \frac{1}{t_1}$$

Mniejsza odległość już znacznie zwiększa rozproszenie strumienia biegunów głównych.

Długość osiowa nabiegunka l'_d w maszynach z trudnymi warunkami komutacji przyjmujemy równą długości nabiegunka bieguna głównego l_m czyli

$$l'_d = l_m$$

W maszynach normalnych można ograniczyć się długością

$$l'_d = \frac{2}{3} \div \frac{3}{4} l_m \quad \text{lub} \quad l'_d = l'_{di} = l_z$$

gdzie l_z - jest długością jaką zajmuje żelazo twornika.

Wysokość nabiegunka bieguna zwrotnego przyjmujemy równą wysokości nabiegunka bieguna głównego.

A m p e r o z w o j e b i e g u n a
z w r o t n e g o .

Zadaniem biegunów zwrotnych, jak wiemy, jest wytworzenie w szczelinie powietrznej indukcji, potrzebnej do skompensowania elektromotorycznej siły komutacji oraz poprzecznego pola reakcji twornika, zatem całkowita ilość amperozwojów bieguna zwrotnego stanowić będzie

$$AZ_d = AZ_k + AZ_r + AZ_m \quad 115.$$

gdzie AZ_k - amperozwoje potrzebne do wytworzenia w szczelinie powietrznej indukcji B_d pola kompensującego siłę

komutacji czyli inaczej są to amperozwoje, służące do przeprowadzenia strumienia biegunów zwrotnych przez jedną szczelinę powietrzną, AZ_r - amperozwoje, kompensujące poprzeczne pole reakcji twornika, AZ_m - amperozwoje, służące do przeprowadzenia strumienia biegunów zwrotnych przez rdzeń bieguna, część jarzma i rdzenia twornika.

Zwykle amperozwoje AZ_m są niewielkie i przy obliczeniu nie uwzględniamy ich, dodając około 5% do sumy amperozwojów strumienia kompensującego siłę komutacji i reakcji twornika, czyli

$$AZ_d = 1,05 / AZ_k + AZ_r / \quad 116.$$

Amperozwoje kompensujące reakcję twornika we wzorze 116 są to amperozwoje, przypadające na jeden biegun główny, czyli

$$AZ_r = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot AP \quad 119.$$

Gdy maszyna posiada uzwojenie kompensacyjne, wówczas

$$AZ_d = 1,05 \cdot AZ_k \quad 116'$$

Amperozwoje pola kompensującego siłę komutacji

$$AZ_k = 0,8 \cdot B_d \cdot \delta_{di} \quad 117.$$

gdzie B_d - indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej pod biegunem zwrotnym, δ_{di} - długość obliczeniowa szczeliny powietrznej.

Wielkość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej pod biegunem zwrotnym wyraża się znanym nam wzorem

$$B_d = c \cdot c_1 \cdot 2 \cdot \Lambda \cdot AP \cdot \frac{l_z}{l_{di}} \quad (113)$$

Ponieważ w normalnych maszynach przyjmujemy $l'_{di} = l_z$, więc

$$B_d = c \cdot c_1 \cdot 2 \cdot \Lambda \cdot AP \quad (113a)$$

Rzeczywista długość szczeliny powietrznej jest mniejsza od obliczeniowej i wynosi

$$\delta = \frac{\delta_{di}}{k_{1d}}$$

gdzie k_{1d} - jest współczynnikiem nierównomierności indukcji magnetycznej w szczelinie pod biegunem zwrotnym, spowodowanej uzębieniem twornika. Współczynnik ten oblicza się tym samym sposobem, co przy obliczeniu szczeliny pod biegunem głównym, czyli

$$k_{1d} = \frac{t_1}{z_1 + \lambda \delta_d}$$

Zwykle rzeczywistą długość szczeliny pod biegunem zwrotnym należy dobrać w ten sposób, aby stosunek amperozwojów biegunów zwrotnych do amperozwojów twornika wynosił

$$\eta = \frac{AZ_d}{AZ_r} = 1,15 - 1,50$$

a wówczas rzeczywista długość szczeliny pod biegunem zwrotnym wypada około dwa razy większa od rzeczywistej

długości szczeliny pod biegunem głównym.

Rozwiązując równanie 117:113a znajdziemy liczbę amperozwojów, niezbędną do wytworzenia, przez jeden biegun zwrotny, strumienia kompensującego siłę komutacji.

$$AZ_k = C \cdot C_1 \cdot 1,6 \cdot \bar{A} \cdot AP \quad 118.$$

zaś całkowite amperozwoje jednego bieguna zwrotnego

$$AZ_d = 1,05 / AZ_k + AZ_r / = 1,05 \cdot AP / C \cdot C_1 \cdot 1,6 \cdot \delta_{di} \cdot \bar{A} + 0,5 \tau /$$

Znając normalną wielkość prądu $/J/$, wychodzącego z twornika maszyny, możemy obliczyć liczbę zwojów uzwojenia wzbudzającego biegun zwrotny

$$Z_d = \frac{AZ_d}{J}$$

Dla lepszego chłodzenia uzwojenie biegunów zwrotnych jest przeważnie jednowarstwowe i nawijane, bezpośrednio na izolowanych np. preszpanem rdzeniach, drutem miedzianym nieizolowanym, przytem, aby zabezpieczyć przed zetknięciem się zwojów, daje się między zwojami sznurki konopne lub wkładki preszpanowe.

Strumień magnetyczny przechodzący przez szczelinę powietrzną pod biegunem zwrotnym wynosi

$$\Phi'_d = B_d \cdot l_{di} \cdot b_{di} \approx B_d \cdot Q_{di}$$

gdzie Q_{di} - jest obliczeniowym przekrojem szczeliny powietrznej, który praktycznie możemy wyliczyć ze wzoru

$$Q_{di} = /l'_d + 3\delta_d / \cdot /b'_d + 3\delta_d /$$

Strumień magnetyczny, jaki przechodzi przez rdzeń bieguna zwrotnego, jest oczywiście większy niż w

szczelinie, gdyż część ulegnie rozproszeniu, więc

$$\phi_d = \phi_k + \phi_r + \phi_s$$

gdzie ϕ_k - strumień kompensujący siłę komutacji, ϕ_r - strumień kompensujący poprzeczne pole reakcji twornika, ϕ_s - strumień rozproszony.

Ponieważ poprzeczne pole reakcji twornika działa na biegun zwrotny rozmagnesowująco, czyli zmniejsza jego strumień, więc strumień reakcji możemy również traktować jako strumień rozproszony, zatem ogólny strumień rozproszony bieguna zwrotnego

$$\phi_{rs} = \phi_r + \phi_s$$

wobec czego

$$\phi_d = \phi_k + \phi_{rs}$$

skąd

$$\phi_k = \phi_d - \phi_{rs}$$

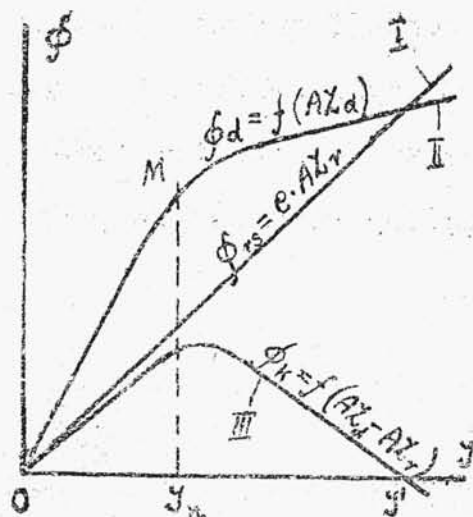
Stosunek wielkości strumienia, przechodzącego przez rdzeń bieguna zwrotnego, do wielkości strumienia, przechodzącego przez szczelinę, czyli strumienia kompensującego siłę komutacji, nazywamy współczynnikiem rozproszenia magnetycznego biegunów zwrotnych

$$\zeta = \frac{\phi_d}{\phi_k}$$

Dla normalnych maszyn współczynnik ten wynosi 2-4.

Strumień rozproszony ϕ_{rs} a więc i strumień kompensujący reakcję twornika jest proporcjonalny do całko-

witych amperozwojów AZ_d bieguna zwrotnego, a strumień ϕ_k , kompensujący siłę komutacji, zależny jest od różnicy $/AZ_d - AZ_r/$ amperozwojów bieguna zwrotnego i amperozwojów reakcji twornika.



Rys.128.

Maszyn z biegunami zwrotnymi, lecz bez uzwojenia kompensacyjnego nie można bardzo przeciążać poza granicę normalną, gdyż, pomimo istnienia biegunów zwrotnych, szczotki silnie iskrzą, szczególnie przy znacznych przeciążeniach. Wyjaśnia to wykres, przedstawiony na rys.128. Ogólny

strumień rozproszczenia biegunów zwrotnych zmienia się prawie proporcjonalnie do obciążenia /krzywa I/; strumień bieguna zwrotnego, jako istniejący w żelazie, zmienia się proporcjonalnie tylko do pewnej granicy /krzywa II p.M/, poza którą wzrasta wolniej niż prąd twornika; strumień kompensujący siłę komutacji, stanowiący różnicę dwóch pierwszych strumieni, zmieniać się będzie według krzywej III. Widzimy więc, że przy znacznym przeciążeniu /np.przy prądzie J' / pole komutacji zmniejsza się do zera i rola biegunów zwrotnych, jako środek do poprawienia komutacji, staje się bez znaczenia.

Wskutek rozproszenia wielkość strumienia magnetycznego wzdłuż rdzenia bieguna zwrotnego jest niejednakowa, większa bliżej jarzma i mniejsza przy nabiegunkniku, wobec czego rdzeń bieguna zwrotnego, należy obliczać według pewnego strumienia średniego

$$\phi_{d\text{sr}} = \frac{\phi_k + \phi_d}{2} = \frac{\phi_k + G_d \phi_k}{2} = \frac{1 + G_d}{2} \phi_k$$

Zakładając $G_d = 2 - 4$ mamy

$$\phi_{d\text{sr}} = 1,5 \div 2,5 \cdot \phi_k$$

Mając wielkość strumienia możemy znaleźć przekrój rdzenia bieguna zwrotnego

$$Q_d = \frac{\phi_{d\text{sr}}}{B_{dr}}$$

a następnie poszczególne wymiary.

Indukcja w biegunach zwrotnych waha się w granicach 6000 - 8000 gaussów.

Długość /osiowa/ rdzenia bieguna zwykle wynosi

$$l_d = \frac{2}{3} l'_d$$

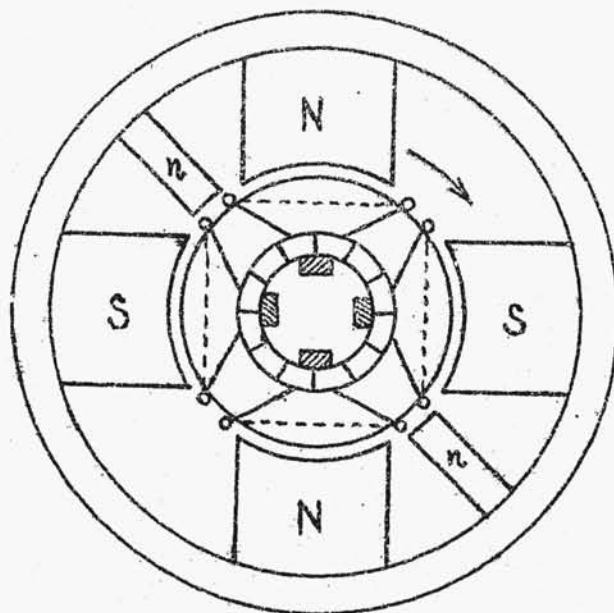
a szerokość

$$b_d = \frac{Q_d}{l_d} \leq b'_d$$

Liczba biegunów zwrotnych zwykle jest równa liczbie biegunów głównych. Jednakże niekiedy w przypadku uzwojenia tworników bębnowych z poskokiem pełnym, nieskróconym lub z niewielkim skróceniem, liczba biegunów zwrotnych może być dwa razy mniejsza.

Przy kompensacji siły komutacji nie zależy w

którem miejscu zwartej sekcji indukuje się siła kompensująca, czy z jednego boku sekcji, czy też z obu boków.



Rys.129.

Na rys.129 pokazana jest prądnica czterobiegunowa z dwoma biegunami zwrotnymi. Tu każdy biegun zwrotny musi wytworzyć taki strumień, aby skompensować całkowitą siłę komutacji dwóch sekcji. Wymiary takiego bieguna muszą być odpowiednio zwiększone.

Przy zmniejszonej liczbie biegunów zwrotnych, stosunek amperozwojów bieguna zwrotnego do amperozwojów pola poprzecznego powinien wynosić

$$\eta = \frac{AZ_d}{AZ_r} = 1,7 \div 1,8$$

Zmniejszenie liczby biegunów zwrotnych posiada pewne zalety jak: ekonomja miedzi, lepsza wentylacja ma-

szyny, mniejsze rozproszenie magnetyczne biegunów głównych i t.p. W maszynach średniej i dużej mocy zwykle liczba biegunów zwrotnych równa jest liczbie biegunów głównych.

Jest pożądanem, aby prawidłowa komutacja prądu zachodziła nie tylko przy normalnej i ciągłej pracy, lecz także przy znacznych i raptowanych zmianach obciążenia.

W ostatnim przypadku, wskutek hamującego działania prądów wirowych, powstających w rdzeniach biegunów zwrotnych, na strumień tych biegunów następuje opóźnienie strumienia względem prądu, wzbudzającego bieguny zwrotne, czyli względem prądu twornika i, pomimo istnienia biegunów zwrotnych, szczotki iskrzą. Dlatego w tym przypadku bieguny zwrotne robi się całkowicie z blach żelaznych, podobnie jak twornik, izolowanych między sobą papierem lub lakierem.