ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 52 ELEKTRYKA z.12 1962

WŁADYSŁAW PASZEK

Katedra Maszyn Elektrycznych

WŁAŚCIWOŚCI KONSTRUKCYJNE WIELOSTOPNIOWYCH WZMACNIACZY ELEKTROMASZYNOWYCH

Streszczenie. Autor przeprowadza podział wielostopniowych wzmacniaczy elektromaszynowych na wzmacniacze wielotwornikowe i jednotwornikowe, wielo lub jednokomutatorowe.
Wzmacniacze jednokomutatorowe z kolei dzielą się na wzmacniacze o jednakowej bądź różnej liczbie biegunów na poszczególnych stopniach. Porównano rozwiązania konstrukcyjne wzmacniaczy wielostopniowych. Przedstawiono analizę układu biegunów komutacyjnych.

1. Łączenie kaskadowe wzmacniaczy elektromaszynowych

Kaskadowe łączenie prowadzi do powiększenia dobroci wzmocnieria mocy wzmacniaczy jednostopniowych. Transmitancja kaskady wzmacniaczy jest bardziej skomplikowana aniżeli transmitancja wzmacniacza jednostopniowego, ponieważ przebiegi nieustalone kaskady są określone przez parametry wszystkich wzmacniaczy łączonych w kaskadę. Przy połączeniu kaskadowym wzmacniaczy transmitancja całej kaskady jest równa iloczynowi transmitancji wzmacniaczy składowych. W konsekwencji statyczny współczynnik wzmocnienia kaskady wzmacniaczy inercyjnych pierwszego rzędu jest równy iloczynowi współczynników wzmocnienia. Zastępcza stała czasowa T_z funkcji przejścia jest równa sumie stałych czasowych wzmacniaczy składowych. Biorąc pod uwagę, że współczynniki wzmocnienia mocy wzmacniacza wyrażone są liczbą dużą, znacznie większą od jedności, a stała czasowa liczona w sekundach liczbą małą, otrzymamy w wyniku połączenia kaskadowego powiększenie dobroci wzmocnienia mocy. Niepożądaną konsekwencją łączenia kaskadowego jest:

a) uczulenie napięcia wyjściowego wzmacniacza na wahania prędkości wirowania. Z uwagi na to, że współczynnik

wzmocnienia napięcia kaskady n - stopniowej jest wyrażony iloczynem współczynników wzmocnienia stopni składowych, z których każdy zależy liniowo od prędkości wirowania, wahania prędkości wirowania wpływają w n - tej potędze na napięcie wyjściowe wzmacniacza,

b) zmalenie do zera początkowej stromości narastania napięcia wyjściowego.

Początkowy przebieg napięcia wyjściowego przy skokowej zmianie napięcia sterującego jest styczny do przebiegu parabolicznego o wykładniku potęgowym równym liczbie stopni inercyjnych łączonych w kaskadę (rys.1a). W przypadku wzmacniacza n - stopniowego otrzymamy

$$E(p) = U_s \frac{K_E}{(1+pT_1)(1+pT_2)\ldots(1+pT_n)} \qquad (1a)$$

$$E(t) \approx \frac{U_s K_E t^n}{T_1 T_2 \ldots T_n} \qquad \text{dla} \quad E \ll E_u = U_s K_E$$

przy czym

$$K_E = K_{u1} K_{u2} \ldots K_{En}$$

Początkowe wartości napięcia i jego pochodnych aż do rzędu (n - 1) równają się zero.

W miarę powiększenia liczby stopni rośnie początkowe opóźnienie narastania napięcia, dając w granicy przy nieograniczonej liczbie stopni zjawisko czasu martwego.

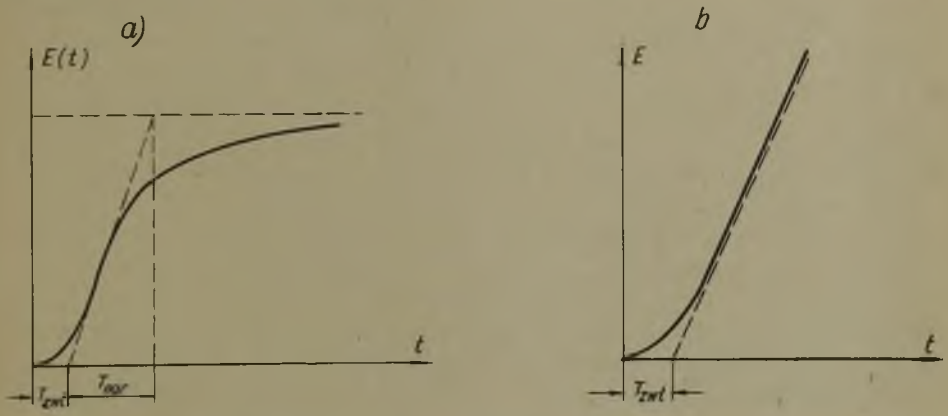
Początkowe opóźnienie przebiegu funkcji przejścia na skutek inercji składowych stopni wzmocnienia można ocenić w przypadku kaskady kilku stopni wzmocnienia obliczając umowne czasy: czas zwłoki $T_{zwł}$ i czas narastania wielkości wyjściowej T_{nar}. Umowne czasy (rys.1a) są wyznaczone przez prostą styczną w punkcie przegięcia do przebiegu funkcji przejścia. W przypadku wzmacniacza dwustopniowego bez sprzężeń zwrotnych, którego stałe czasowe obu stopni wzmocnienia są sobie równe ($T_1 = T_2 = T$)

$$T_{zwł} = T(3 - e) \qquad T_{nar} = Te \qquad (2a)$$

Jeżeli jeden z n - stopni wzmocnienia (przeważnie jest to stopień ostatni) pracuje przy krytycznym napięciowym sprzężeniu zwrotnym transmitancja wzmacniacza

$$\frac{E(p)}{U_s(p)} = \frac{K_E}{(1+pT_1)\,(1+pT_2)\ldots(1+pT_{n-1})pT_n} \qquad (1b)$$

Początkowy przebieg napięcia wyjściowego jest parabolą o wykładniku n (rys.1b).



Rys.1. Funkcja przejścia wzmacniacza wielostopniowego bez sprzężeń zwrotnych (a) i z napięciowym krytycznym sprzężeniu zwrotnym w ostatnim stopniu wzmocnienia

Równanie skośnej prostoliniowej asymptoty

$$E(t) = \frac{K_E\, t}{T_n}\,(1 - T_{zwr}) \qquad (2b)$$

$$T_{zwł} = T_1 + T_2 + \ldots T_{n-1}$$

W przypadku istnienia sprzężeń zwrotnych zmienia się transmitancja kaskady w wyniku czego zmienia się zarówno charakter przebiegu funkcji przejścia (może wystąpić np. oscylacyjny charakter przebiegu), zastępcza stała czasowa, styczny przebieg początkowy, czas zwłoki i czas narastania napięcia wyjściowego.

Wzmacniacz wielostopniowy działający na zasadzie kaskady inercyjnych wzmacniaczy jednostopniowych może tworzyć jedną całość konstrukcyjną. Połączenie kaskadowe wzmacniaczy jednostopniowych w jeden wzmacniacz wielostopniowy może zostać zrealizowane konstrukcyjnie w dwojaki sposób:

a) przy zastosowaniu wzmacniacza wielotwornikowego przez konstrukcyjne połączenie za pomocą wspólnej obudowy,

b) przy zastosowaniu wzmacniacza jednotwornikowego przez superpozycję kilku pól wzbudzenia przynależnych do poszczególnych stopni wzmocnienia w jednej maszynie.

We wzmacniaczach jednotwornikowych zachodzi konieczność funkcjonalnego rozdzielenia (odsprzężenia) pól wzbudzenia poszczególnych stopni, aby usunąć wewnętrzne sprzężenie zwrotne. Rozdzielenie pól wzbudzenia możemy otrzymać dwoma metodami: a) przez wzajemne skręcenie osi przepływów wzbudzenia poszczególnych stopni o tej samej liczbie par biegunów p, lub b) przez zastosowanie superpozycji przepływów wzbudzenia o wielokrotnej liczbie par biegunów na poszczególnych stopniach. W przypadku a) wzmacniacz posiada wypadkowe 2p-biegunowe pole wzbudzenia o przebiegu symetrycznym pod każdą podziałką biegunową, w przypadku b) pole wzbudzenia ma przebieg niesymetryczny.

Warunkiem koniecznym dla odsprzężenia poszczególnych stopni wzmocnienia jest użycie właściwego typu uzwojenia twornika. Wzmacniacz wielotwornikowy posiada zalety wynikające z rozdzielenia obwodów magnetycznych poszczególnych stopni wzmocnienia: łatwość usunięcia niepożądanych wewnętrznych sprzężeń zwrotnych i możliwości doboru optymalnych parametrów oddzielnie dla każdego stopnia wzmocnienia. Oczywiście koszt budowy takiego wzmacniacza jest większy, ponieważ nie wiele różni się od kosztu oddzielnych jednostopniowych wzmacniaczy elektromaszynowych pracujących na wspólnym wale sprzężonym z silnikiem napędowym. Wadą takiego układu jest kumulowanie zniekształceń charakterystyk sterowania poszczególnych stopni wzmocnienia spowodowanych przez pętlicę histerezy i magnetyzm szczątkowy.

We wzmacniaczu jednotwornikowym kumulacja tych zniekształceń jest mniejsza. Wzmacniacze jednotwornikowe dzielą się ogólnie na wzmacniacze wielokomutatorowe i wzmacniacze jednokomutatorowe. Znaczenie praktyczne posiadają wzmacniacze conajwyżej dwukomutatorowe.

2. Dwukomutatorowy jednotwornikowy wzmacniacz dwustopniowy

Wirnik wzmacniacza posiada dwa oddzielne uzwojenia twornika przyłączone do oddzielnych komutatorów. Oddzielne uzwojenie i komutatory przynależą do dwu stopni wzmocnienia. Stojan jest wspólny dla obu stopni wzmocnienia. Rozdzielenie pól wzbudzenia dwóch stopni wzmocnienia we wspólnym stojanie i wirniku może być dokonane dwoma sposobami:

a) na zasadzie superpozycji dwu pól wzbudzenia o parzystej wielokrotności par biegunów,

b) na zasadzie superpozycji dwu pól wzbudzenia o jednakowej liczbie par biegunów i o osiach wzajemnie elektrycznie prostopadłych.

Uzwojenia wzbudzenia są umieszczone na poszczególnych pieńkach biegunowych. W przypadku a) w stopniu wzmocnienia o wyższej liczbie par biegunów poszczególne pieńki biegunowe przynelżą do oddzielnych biegunów pola wzbudzenia, dla stopnia o mniejszej liczbie par biegunów tworzą parami jeden biegun pola wzbudzenia. Rozdział bieguna na dwie pary pieńków nosi nazwę rozszczepienia bieguna.

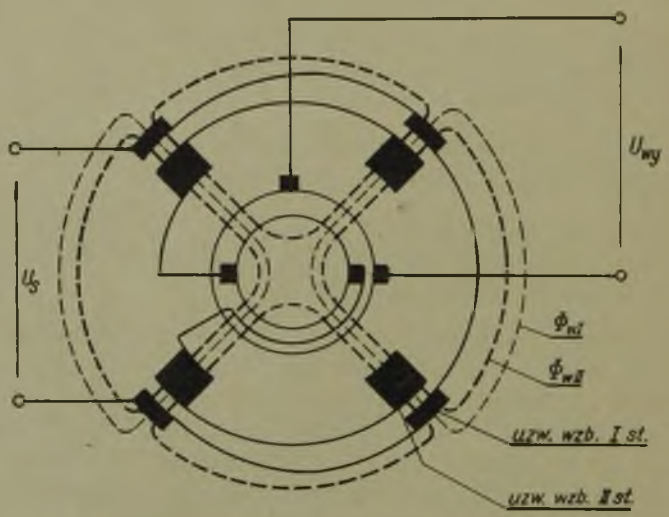
Każde z dwóch oddzielnych uzwojeń twornika jest dostosowane do swego pola wzbudzenia. Uzwojenie twornika o wyższej liczbie par biegunów jest wykonane jako uzwojenie faliste proste.

Napięcie zbieramy ze szczotek rozmieszczonych na dwóch oddzielnych komutatorach przynależnych do odnośnych stopni wzmocnienia. Napięcie zbierane z komutatora pierwszego stopnia wzmocnienia służy do zasilania obwodu wzbudzenia stopnia następnego. W przypadku superpozycji dwu pól wzbudzenia o parzystej wielokrotności par biegunów wypadkowe napięcie rotacji twornika zbierane ze szczotek jest proporcjonalne do strumienia wzbudzenia o tej samej biegunowości co biegunowość odnośnego uzwojenia twornika.

Napięcia rotacji wytworzone przez pole innej biegunowości znoszą się w poszczególnych gałęziach twornika zarówno w uzwojeniu o niższej liczbie par biegunów jak i w uzwojeniu falistym o wyższej liczbie par biegunów, i nie wpływają na napięcie zbierane ze szczotek komutatora.

Wzajemne oddziaływanie pól wzbudzenia i pól reakcji twornika obu stopni na siebie występuje tylko przy nasyceniu obwodu magnetycznego, Przy właściwym zwymiarowaniu obwodu magnetycznego nasycenie nie występuje. W konsekwencji można stosować superpozycje strumieni magnetycznych przynależnych

do obu stopni wzmocnienia i uważać wzmacniacz za kaskadowe połączenie dwóch jednostopniowych wzmacniaczy inercyjnych bez wewnętrznych sprzężeń zwrotnych. Na rys.2 przedstawiono

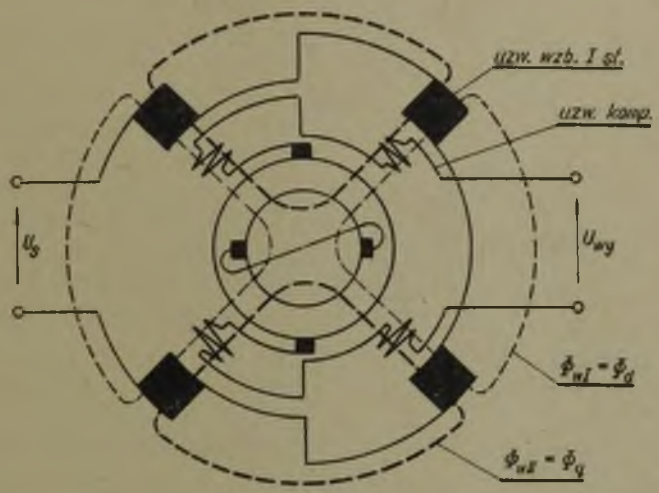


Rys.2. Wzmacniacz dwukomutatorowy z dwu i czterobiegunowym polem wzbudzenia

schemat ideowy obwodów wzmacniacza dwukomutatorowego, w którym pole wzbudzenia otrzymuje się przez superpozycję dwubiegunowego i czterobiegunowego przepływu wzbudzenia [6] Dla poprawienia warunków komutacji obu uzwojeń twornika, dwubiegunowe uzwojenie wzbudzenia złożone jest z oddzielnych cewek umieszczonych na pieńkach stojana. Przy takim rozdzielaniu cewek przebieg indukcji wzdłuż obwodu twornika wykazuje w strefach międzypieńkowych niewielką wartość indukcji Pole w strefie komutacyjnej wytworzone przez uzwojenie wzbudzenia na pierwszym stopniu wzmocnienia o niższej liczbie par biegunów indukuje prądy wyrównawcze między szczotkami tej samej biegunowości na drugim stopniu. Z tego powodu pole w strefie komutacyjnej winno być możliwie małe. Pole nie wpływa na komutację szczotek jeśli prąd obciążenia z uzwojenia falistego jest zbierany przy pomocy tylko jednej pary szczotek.

Przy zastosowaniu jednej pary szczotek zezwoje komutujące są rozłożone równomiernie w strefach komutujących i wypadkowe napięcie indukowane przez pole o niższej biegunowości

znosi się w obwodzie zwartym przez szczotkę. Zastosowanie tylko jednej pary szczotek powoduje oczywiście zwiększenie obciążenia prądowego przypadającego na jeden sworzeń szczotkowy. W przypadku b) zasada działania wzmacniacza jednotwornikowego (rys.3) o elektrycznie prostopadłych polach wzbudzenia (wzmacniacza z polem poprzecznym) jest analogiczne jak w przypadku amplidyny.



Rys.3. Wzmacniacz dwukomutatorowy z polem poprzecznym

Uzwojenia twornika są przyłączone do galwanicznie rozdzielonych komutatorów. Oba uzwojenia twornika są wykonane na tę samą liczbę biegunów o rozpiętości boków najczęściej średnicowej (rzadziej skróconej do połowy). Osie pól wzbudzenia wytworzonych przez uzwojenia wzbudzenia dwu stopni wzmocnienia są rozchylone pod kątem elektrycznym 90°, przez co uzyskuje się rozdzielenie napięć rotacji zbieranych ze szczotek przynależnych do dwóch komutatorów i do dwóch uzwojeń twornika. Napięcia rotacji są proporcjonalne do odnośnych strumieni wzbudzenia obu stopni. Wzajemne oddziaływanie obu stopni wzmocnienia występuje na skutek oddziaływania twornika na drugim stopniu wzmocnienia, którego oś jest skierowana przeciwko przepływowi wzbudzenia na pierwszym stopniu wzmocnienia. Oddziaływanie to jest równoważne szkodliwemu ujemnemu prądowemu sprzężeniu zwrotnemu z drugiego stopnia wzmocnienia. W celu odsprzężenia oddziaływanie to

jest starannie skompensowane za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej zasilanego prądem głównego obwodu drugiego (końcowego) stopnia wzmocnienia. Pole wzbudzenia skierowane jest na pierwszym stopniu w osi podłużnej, na drugim w osi poprzecznej.

Oddziaływanie twornika na pierwszym stopniu można skompensować bądź wykorzystać do wytworzenia przepływu wzbudzenia na drugim stopniu.

Z uwagi na to, że moc wyjściową wzmacniacza zbieramy z ostatniego stopnia wzmocnienia wymiary geometryczne wzmacniacza są określone przez wyzyskanie ferromagnetyka na drugim stopniu wzmocnienia. Pierwszy stopień wzmocnienia daje tylko wstępne wzmocnienie wzmacniacza i wyzyskanie ferromagnetyka na tym stopniu wzmocnienia nie jest duże. Z uwagi na superpozycję pola wzbudzenia obu stopni małe wyzyskanie ferromagnetyka na pierwszym stopniu nie odbywa się kosztem nadmiernego powiększenia wymiarów geometrycznych wzmacniacza.

Wzmacniacz jest równoważny kaskadzie dwóch oddzielnych wzmacniaczy jednostopniowych, w których zarówno pierwszy jak i drugi stopień jest zbudowany przy użyciu maszyny elektrycznej o tych samych wymiarach. W każdej z tych maszyn objętość miedzi twornika jest równa objętości miedzi uzwojenia twornika równoważnego wzmacniacza dwukomutatorowego. Rozumowanie to uzasadnia zysk polegający na zmniejszeniu wymiarów wzmacniacza. Dodatkowy zysk otrzymuje się przy wykorzystaniu oddziaływania twornika pierwszego stopnia wzmocnienia jako przepływu wzbudzenia na drugim stopniu, ponieważ w ten sposób sprawność głównego obwodu na pierwszym stopniu wzmocnienia rośnie do jedności. W tym przypadku (przy pominięciu oporności przejścia szczotek) oporność wewnętrzna twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia równa jest oporności użytkowej w tym obwodzie.

Przez wyposażenie wirnika w dwa rozdzielone galwanicznie uzwojenia twornika uzyskuje się możliwość dowolnego wyboru znamionowego prądu i napięcia rotacji zarówno w osi poprzecznej jak i podłużnej twornika. Przyjmując większą wartość napięcia rotacji w osi poprzecznej aniżeli w amplidynie, możemy w łatwy sposób wyeliminować niepożądany udział nieliniowej oporności przejścia szczotek poprzecznych w łącznej oporności poprzecznego obwodu głównego. Nieliniowość ta powoduje zniekształcenie charakterystyki sterowania. Korzyści są jednakże niewspółmierne z podrożeniem budowy spowodowanym dwoma komutatorami i dwoma uzwojeniami twornika [9]

3. Jednokomutatorowy wzmacniacz dwustopniowy z polem poprzecznym

Dwustopniowy wzmacniacz jednokomutatorowy z polem poprzecznym - zwany powszechnie amplidyną, można uważać za ulepszenie i uproszczenie konstrukcyjne wzmacniacza dwukomutatorowego z polem poprzecznym, w którym dwa oddzielne komutatory i uzwojenia twornika zastąpiono przez jeden komutator przyłączony do wspólnego uzwojenia twornika.

Na skutek wykorzystania tego samego uzwojenia twornika napięcia rotacji na pierwszym i drugim stopniu wzmocnienia są galwanicznie nierozdzielone na skutek czego między szczotkami przynależnymi do osi podłużnej i poprzecznej występuje napięcie różne od zera. Z uwagi na to, że główny obwód w osi poprzecznej jest obwodem wewnętrznym wzmacniacza, galwaniczne połączenie obwodu podłużnego i poprzecznego twornika amplidyny nie przynosi uszczerbku własnościom wzmacniacza.

Podobnie jak we wzmacniaczu dwukomutatorowym możliwe są ogólnie 3 sposoby wytwarzania przepływu wzbudzenia na drugim stopniu wzmocnienia:

a) wykorzystanie oddziaływania twornika (wyłącznie lub częściowo) do wytwarzania przepływu wzbudzenia,

b) skompensowanie oddziaływania twornika za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej i wytworzenie przepływu wzbudzenia za pomocą oddzielnego uzwojenia wzbudzenia (uzwojenia poprzecznego) o osi zgodnej z kierunkiem oddziaływania,

c) skompensowanie oddziaływania twornika za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej i wytworzenie przepływu wzbudzenia za pomocą oddzielnego uzwojenia wzbudzenia w kierunku przeciwnym do reakcji twornika.

Najtańszy i najbardziej rozpowszechniony jest przypadek a. Z punktu widzenia sposobu rozmieszczenia przepływów wzbudzenia wzdłuż obwodu twornika można podzielić amplidyny na trzy typy:

1) amplidyny z biegunami rozszczepionymi, w których występuje superpozycja strumieni wzbudzenia obu stopni w poszczególnych pieńkach biegunowych (w amplidynach tego typu twornik posiada uzwojenie średnicowe [4] [6] [7] [8].

2) amplidyny z biegunami wyodrębnionymi, w których strumień wzbudzenia pierwszego i drugiego stopnia posiada wyodrębnione pieńki biegunowe. (w amplidynach tego

typu twornik: posiada uzwojenie pętlicowe, skrócone do 1/2, bądź uzwojenie średnicowe o podwójnym układzie szczotek poprzecznych) [6] [8],

3) amplidyny z trójdzielnym układem biegunów, w których występują elementy typu a i b (w amplidynach tego typu twornik posiada uzwojenie pętlicowe skrócone do 2/3). [6] [8].

Najbardziej rozpowszechniony jest typ pierwszy. Rzadziej spotykamy typ drugi, który nosi również nazwę firmową "magnikon". Typ trzeci stosuje firma francuska Alsthon dla wzmacniaczy małej mocy (do 2 kW). [13]. Na rys.4a,b,c przedstawiono w sposób ideowy budowę amplidyn trzech wymienionych typów. Zaznaczono strumienie wzbudzenia oraz okłady prądu wzbudzenia na obu stopniach wzmocnienia. W amplidynie o biegunach rozszczepionych strumienie wzbudzenia dwóch stopni wzmocnienia nakładają się w pieńkach biegunowych, natomiast w jarzmie, strumienie te są rozdzielone.

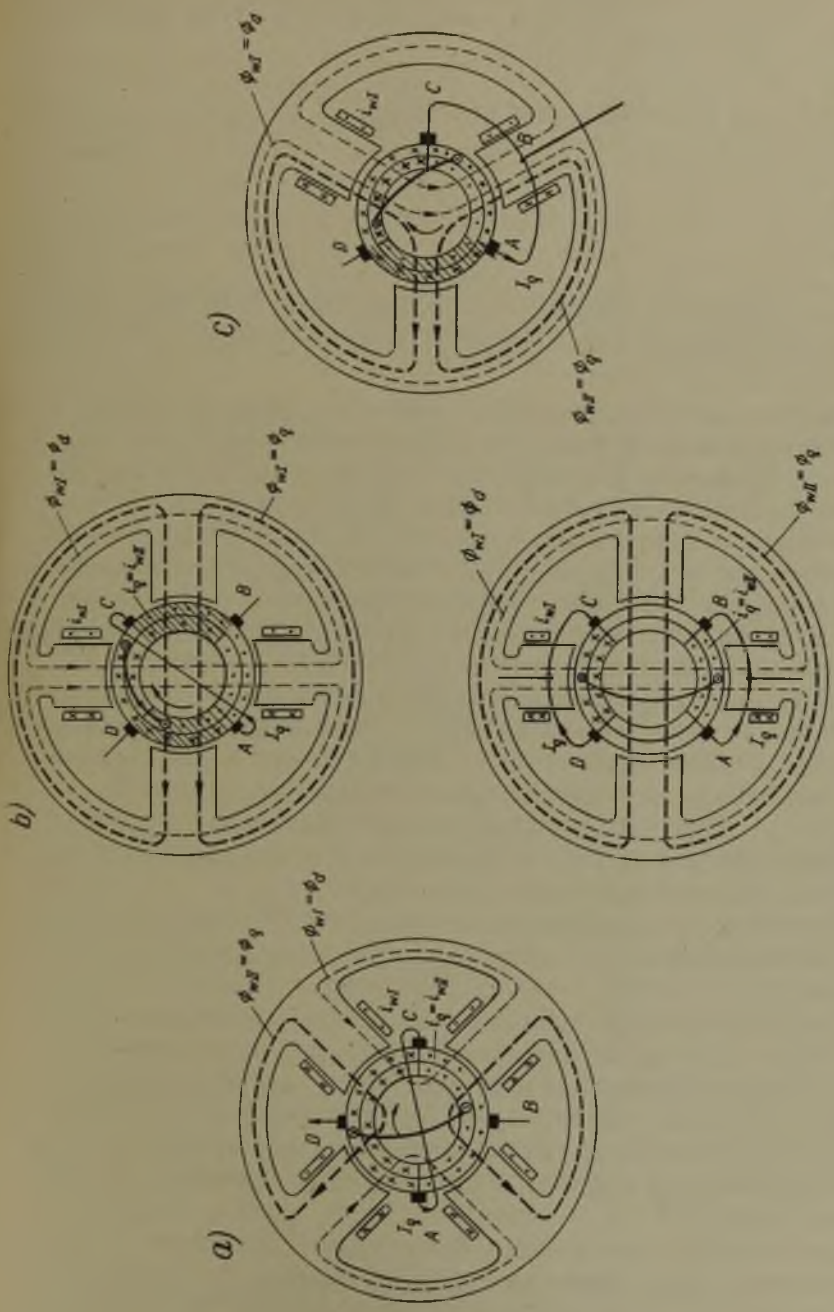
Para biegunów rozszczepionych tworzy jeden biegun odnośnego stopnia wzmocnienia. W amplidynie o biegunach wyodrębnionych poszczególne pary pieńków biegunowych tworzą naprzemian bieguny odnośnego stopnia wzmocnienia. W tym typie amplidyny oba strumienie wzbudzenia nakładają się w jarzmie. $\zeta\alpha_\tau$ - stosunek szerokości bieguna do podziałki biegunowej charakteryzujący wykorzystanie podziałki biegunowej - jest w amplidynie o biegunach wyodrębnionych ($\zeta = \frac{1}{2}$) dwukrotnie mniejszy aniżeli w amplidynie o biegunach rozszczepionych ($\zeta = 1$).

Przepływ wzbudzenia na drugim stopniu wzmocnienia jest wielokrotnie większy od przepływu wzbudzenia na stopniu pierwszym. Z tego powodu strumień ten jest strumieniem głównym, który decyduje o wyzyskaniu ferromagnetyka wzmacniacza.

Wyzyskanie ferromagnetyka zależy od średniej wartości indukcji pola głównego. Im przebieg przepływu wzbudzenia na drugim stopniu jest bardziej wyrównany pod biegunem, tym lepiej można wyzyskać ferromagnetyk wzmacniacza, ponieważ wartość indukcji maksymalnej w zakresie normalnej pracy powinna mieścić się na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania.

Wyrównanie przebiegu indukcji pod biegunem jest scharakteryzowane przez współczynnik indukcji średniej

$$\alpha_B = \frac{B}{B_{max}}$$



Rys.4. Podział amplidyn z punktu widzenia sposobu rozmieszczenia przepływu wzbudzenia wzdłuż obwodu twornika: amplidyny z biegunami rozszczepionymi (a) amplidyny z biegunami wyodrębnionymi (b) amplidyny z trójdzielnym układem biegunów (c)

przy czym

B, B_{max} = indukcja średnia oraz maksymalna pola wzbudzenia pod biegunem.

Współczynnik wykorzystania bieguna

$$\alpha = \alpha_B \cdot \alpha_\tau \, \xi$$

uwzględnia wyrównanie indukcji pod biegunem, wypełnienie podziałki biegunowej oraz typ amplidyny (z biegunami wyodrębnionymi bądź rozszczepionymi).

Jak długo wzmacniacz pracuje na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania, tak długo pole podłużne i poprzeczne wzmacniacza na siebie nie oddziałują. Dopiero nasycenie magnetyczne (miejscowe lub całego obwodu magnetycznego) powoduje wzajemny wpływ obu pól na siebie, ponieważ nie zachodzi już w tym przypadku superpozycja strumieni magnetycznych, a jedynie superpozycja przepływów. Nasycenie powoduje zmniejszenie przewodności magnetycznej dla obu strumieni. Zmniejszenie przewodności magnetycznej powoduje w konsekwencji obniżenie współczynnika wzmocnienia napięcia obydwu stopni i wypadkowego współczynnika napięcia. Zmniejszenie przewodności magnetycznej wpływa zatem w drugiej potędze na współczynnik wzmocnienia napięcia. W przypadku wzmacniacza z biegunami wyodrębnionymi oddziaływanie obu pól na siebie przy nasyceniu biegunów jest mniejsze niż we wzmacniaczu z biegunami rozszczepionymi.

W przypadkach gdy zależy na ograniczeniu pułapu wysterowania można zastosować w amplidynie z biegunami rozszczepionymi przewężenie jarzma w osi poprzecznej w miejscu gdzie przenika tylko strumień wzbudzenia pierwszego stopnia wzmocnienia (rys.4a), a w amplidynie z biegunami wyodrębnionymi w pieńkach biegunowych na pierwszym stopniu wzmocnienia (rys.4b). W obu przypadkach ograniczenie pułapu wysterowania wzmacniacza odbywa się na pierwszym stopniu wzmocnienia tj. stopniu o najmniejszej mocy. Oddziaływanie twornika na drugim stopniu wzmocnienia wytwarza sztywne, ujemne prądowe sprzężenie zwrotne wzmacniacza działające z drugiego stopnia wzmocnienia na stopień pierwszy. W zależności od przyjętego kierunku przepływu wzbudzenia drugiego stopnia wzmocnienia względem kierunku oddziaływania twornika pierwszego stopnia otrzymamy w przypadku a i b sprzężenie ujemne, w przypadku c

dodatnie. Z uwagi na to, że sprzężenie to jest tak silne, że uniemożliwia prawidłową pracę wzmacniacza, musimy je zmniejszyć bądź znieść przy pomocy dodatkowego sprzężenia prądowego przeciwnego znaku. To dodatkowe sprzężenie wytwarza uzwojenie kompensacji podłużnej, które kompensuje oddziaływanie twornika na drugim stopniu wzmocnienia. Brak uzwojenia kompensacji podłużnej spowodowałby nadmierne obniżenie współczynnika wzmocnienia w przypadku a) i b) bądź szeregowe samowzbudzenie wzmacniacza w przypadku c).

Uzwojenie kompensacji podłużnej można wykonać jako uzwojenie rozłożone (lepsze lecz droższe) lub skupione. W przypadku skupionego uzwojenia kompensacji podłużnej można skompensować tylko średnią wartość oddziaływania twornika pod biegunem.

Dystorsja pola wzbudzenia jest największa w przypadku skupionego uzwojenia kompensacji, bardzo mała w przypadku uzwojenia rozłożonego w żłobkach niebiegunników, a znika zupełnie w teoretycznym przypadku idealnie rozłożonego uzwojenia kompensacyjnego.

Jeśli występuje miejscowe nasycenie obwodu magnetycznego dystorsja pola wzbudzenia powoduje zmniejszenie przewodności magnetycznej wzmacniacza.

W amplidynie o podwójnym układzie szczotek poprzecznych w obwodzie twornika występują dwie pary segmentów, z których każda przewodzi wyłącznie prąd twornika pierwszego bądź drugiego stopnia umocnienia. Połowa obwodu twornika przewodzi prąd obwodu głównego na stopniu pierwszym, druga połowa przewodzi prąd obwodu głównego na stopniu końcowym, aczkolwiek poszczególne pręty twornika przechodzą cyklicznie ze strefy pierwszego stopnia wzmocnienia do strefy drugiego stopnia wzmocnienia. W pozostałych typach amplidyn następuje w prętach twornika superpozycja prądu obwodu głównego pierwszego i drugiego stopnia wzmocnienia.

Na skutek superpozycji prądu twornika I_q na pierwszym stopniu wzmocnienia i prądu I_d na drugim stopniu wzmocnienia otrzymamy wypadkowy prąd skuteczny twornika I_{sk}.

W amplidynie z biegunami rozszczepionymi i w amplidynie typu magnikom

$$I_{sk} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \tag{4a}$$

W przypadku amplidyny o podwójnym układzie szczotek poprzecznych

$$I_{sk} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \tag{4b}$$

Ponieważ pierwszy stopień wzmocnienia amplidyny jest stopniem małej mocy, prąd I_q (poprzeczny prąd twornika) jest mniejszy od prądu I_d (podłużnego prądu twornika w warunkach pracy znamionowej wzmacniacza. Przeciętnie prąd I_q jest około 2 - 4 razy mniejszy od znamionowego prądu podłużnego. Uzwojenie poprzeczne wspomagające przepływ wytworzony przez oddziaływanie twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia powoduje obniżenie prądu poprzecznego, ponieważ prąd potrzebny do wytworzenia przepływu wzbudzenia zmniejszy się przy powiększonej liczbie zwojów.

Wykorzystując równania (4) ... (12) zamieszczone w [12] wiążące wymiary geometryczne wzmacniacza jednostopniowego i jego podstawowe parametry dla przypadku amplidyny musimy uwzględnić, że wartości niektórych współczynników w równaniach są zmienione na skutek odmiennego kształtu przepływu wzbudzenia wzdłuż podziałki biegunowej na drugim stopniu wzmocnienia oraz na skutek skrócenia poskoku uzwojeń twornika w przypadku amplidyn z biegunami wyodrębnionymi typu magnikom. Przy założeniu, że przepływ wzbudzenia na drugim stopniu wzmocnienia jest wytworzony wyłącznie przez oddziaływanie twornika, otrzymamy w równaniach dla pierwszego stopnia wzmocnienia amplidyny z biegunami rozszczepionymi

$$k_a\varkappa = k_b\varkappa = k_c\varkappa = k_d = k_e = k_f\varkappa = k_g\varkappa(1-\varkappa) = 1$$

$$k_h = 0, \qquad k_i = 1 \tag{4a}$$

i dla drugiego stopnia wzmocnienia tej amplidyny

$$k_a = 1,\ k_b = \frac{1}{2},\ k_c = \frac{1}{4},\ k_d = 2,\ k_e = \frac{1}{4}\left(1+\frac{1}{3}\alpha_r^2\right),\ k_f = k_g = \frac{1}{1+\frac{1}{3}\alpha_r^2}$$

$$k_h = 1, \qquad k_i = 1 \tag{5a}$$

Dla pierwszego stopnia wzmocnienia amplidyny typu magnikom

$$k_a\varkappa = k_b\varkappa = k_c\varkappa = \frac{1}{2},\quad k_d = 1,\quad k_e = \frac{1}{2},\quad k_f\varkappa = 1$$

$$k_g\varkappa(1-\varkappa) = \frac{1}{2}, \qquad k_h = 0,\ k_i = 2 \tag{4b}$$

i dla drugiego stopnia wzmocnienia tej amplidyny

$$k_a = \frac{1}{2},\ k_b = \frac{1}{4},\ k_c = \frac{1}{8},\ k_d = 2,\ k_e = \frac{1}{8}\left(1+\frac{1}{3}\alpha_r^2\right),\ k_f = \frac{1}{1+\frac{1}{3}\alpha_r^2}$$

$$k_g = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{3}\alpha_r^2},\quad k_h = 1,\quad k_i = 2 \qquad (5b)$$

Dla pierwszego stopnia wzmocnienia amplidyny o podwójnym układzie szczotek poprzecznych

$$k_a\varkappa = k_b\varkappa = k_c\varkappa = \frac{1}{2},\quad k_d = 1,\ k_e = \frac{1}{2},\ k_p\varkappa = 1,\ k_g\varkappa(1-\varkappa) = 1$$

$$k_h = 0,\qquad k_i = 1 \qquad (4c)$$

i dla drugiego stopnia wzmocnienia tej amplidyny

$$k_a = \frac{1}{2},\ k_b = k_c = \frac{1}{4},\ k_d = 2,\ k_e = \frac{1}{4}\left(1+\frac{1}{3}\alpha_r^2\right),\ k_f = \frac{1}{1+\frac{1}{3}\alpha_r^2}$$

$$k_g = \frac{1}{2}\ \frac{1}{1+\frac{1}{3}\alpha_r^2}\quad k_h = 1,\quad k_i = 1$$

W równaniach (4) i (5) przyjęto, że nabiegunniki amplidyn są jednakowe i rozmieszczone symetrycznie na obwodzie. Jako objętość miedzi uzwojenia wzbudzenia na drugim stopniu wzbudzenia uwzględniono całą objętość miedzi uzwojenia twornika. Średnia długość zwoju bieguna uzwojenia l_w na drugim stopniu wzmocnienia jest równa długości zwoju twornika l_a. W przypadku amplidyny o podwójnym układzie szczotek poprzecznych przyjęto, że A_{aN} i j_{aN} oznaczają średnie wartości okładu prądu i gęstości prądu, które są dwukrotnie mniejsze od okładu i gęstości w poszczególnych segmentach obwodu twornika.

Na pierwszym stopniu wzmocnienia wartości okładu i gęstości prądu twornika i indukcji średniej w warunkach znamionowych nie są niezależne, lecz związane z analogicznymi wartościami tych wskaźników przyjętymi na stopniu drugim funkcją wymiarów geometrycznych, prędkością wirowania i sprawnością głównego obwodu na stopniu drugim. Wzmacniacz z rozszczepionymi biegunami ma najmniejsze wymiary geometryczne, ponieważ jego strumień główny przenika przez wszystkie cztery pieńki biegunowe. W amplidynie z biegunami wyodrębnionymi można uzyskać większy zakres prostoliniowości charakterystyki sterowania kosztem zmniejszenia wykorzystania obwodu magnetycznego.

4. Porównanie amplidyny ze wzmacniaczem dwukomutatorowym

Amplidynę można uważać za ulepszenie dwukomutatorowego wzmacniacza jednotwornikowego. W amplidynie otrzymujemy przy tych samych wymiarach geometrycznych większy współczynnik wzmocnienia mocy i większą moc wyjściową aniżeli we wzmacniaczu dwukomutatorowym, ponieważ ta sama objętość miedzi twornika określa własności wzmacniacza dla obu stopni wzmocnienia amplidyny. Równoważna kaskada dwóch oddzielnych wzmacniaczy jednostopniowych musiałaby posiadać tę samą objętość miedzi aktywnej w twornikach obu maszyn.

Objętość miedzi aktywnej twornika wpływa decydująco na dobroć wzmocnienia mocy wzmacniacza. Przy tym samym uzwojeniu sterującym, tym samym obwodzie magnetycznym tej samej objętości miedzi twornika dobroć wzmocnienia mocy amplidyny wypada wielokrotnie większa aniżeli we wzmacniaczu dwukomutatorowym. Oznaczając przez Q_{pa} dobroć wzmocnienia mocy amplidyny zdefiniowaną jako stosunek współczynnika wzmocnienia mocy do zastępczej stałej czasowej $T_z = T_1 + T_2$ równej sumie stałych czasowych obwodów wzbudzenia pierwszego i drugiego stopnia wzmocnienia, a przez Q_p dobroć wzmocnienia mocy wzmacniacza dwukomutatorowego otrzymamy

$$\frac{Q_p}{Q_{pa}} = \left(\frac{k}{k+1}\right)^2 \frac{a+1}{a(k+1)+k}, \qquad (6)$$

gdzie

$k = \frac{V_{a1}}{V_{a2}}$ - stosunek miedzi aktywnej twornika na pierwszym i drugim stopniu wzmocnienia wzmacniacza dwukomutatorowego,

$a = \frac{T_1}{T_2}$ - stosunek stałej czasowej uzwojenia sterującego i uzwojenia twornika amplidyny.

Jednocześnie przy tej samej skutecznej gęstości prądowej twornika wzrośnie znamionowy prąd wyjściowy amplidyny

$$\frac{I_{dNa}}{I_{dN}} = \frac{1+k}{\sqrt{1 + k^2}}$$

Jeśli założymy

$$a = 1, \quad k = \frac{V_{a1}}{V_{a2}} = \frac{I_q}{I_d} \approx 0,3$$

otrzymamy

$$\frac{Q_p}{Q_{pa}} = 0,065 \qquad \frac{I_{dNa}}{I_{dN}} = 1,24$$

5. Jednokomutatorowy wzmacniacz wielostopniowy o różnej liczbie par biegunów w poszczególnych stopniach wzmocnienia

5.1. Wzmacniacz trójstopniowy

Jako podstawę do konstrukcji wzmacniacza trójstopniowego można wykorzystać dwustopniowy wzmacniacz z polem poprzecznym z biegunami wyodrębionymi typu magnikon, który można wyposażyć w trzeci stopień wzmocnienia. Odsprzężenie dwubiegunowych przepływów wzbudzenia na pierwszym i drugim stopniu wzbudzenia następuje za pomocą wzajemnego skręcenia przepływów o kąt elektryczny 90°, oraz za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej. Przepływ wzbudzenia na trzecim stop-

niu wzmocnienia jest odsprzężony od dwóch poprzednich stopni za pomocą superpozycji czterobiegunowego przepływu wzbudzenia. Przepływ czterobiegunowy jest wytworzony przez uzwojenie wzbudzenia umieszczone na czterech pieńkach biegunowych.

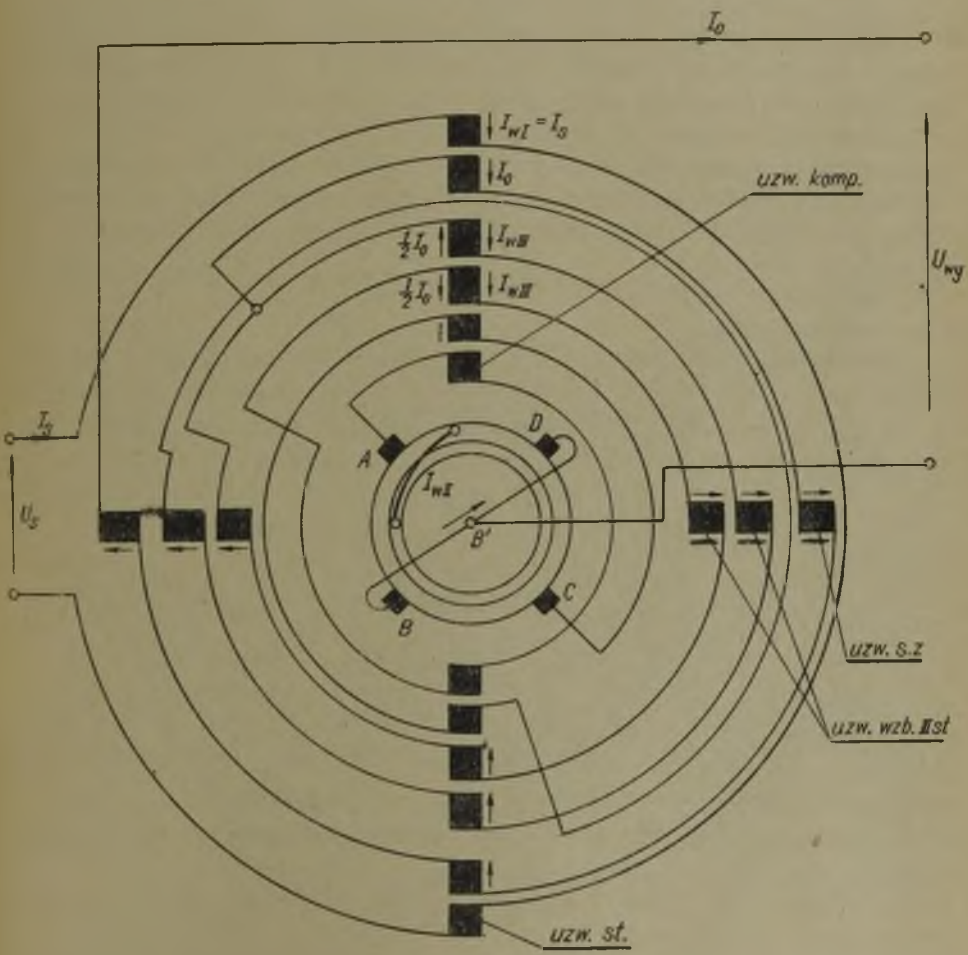
Czterobiegunowe uzwojenie wzbudzenia jest zasilane prądem zbieranym z twornika na drugim stopniu wzmocnienia. Pętlicowe skrócone do połowy uzwojenie twornika magnikonu jest w odniesieniu do czterobiegunowego przepływu wzbudzenia uzwojeniem pętlicowym średnicowym. Napięcie wyjściowe prądnicy czterobiegunowej jest zbierane normalnie z dwóch par szczotek, parami zwartych. W przypadku magnikonu, w którym przepływ wzbudzenia na drugim stopniu wzmocnienia jest wytworzony przez oddziaływanie twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia, jedna para szczotek AC jest zwarta tworząc w ten sposób jeden zacisk wyjściowy wzmacniacza. Drugi zacisk wyjściowy nie jest bezpośrenio dostępny, bowiem druga para szczotek BD jest przyłączona poprzez uzwojenie kompensacji magnikonu do czterobiegunowego uzwojenia wzbudzenia na trzecim stopniu wzmocnienia. Zachodzi równomierny rozpływ prądu obciążenia wzmacniacza do równoległych gałęzi twornika jeśli drugi zacisk wyjściowy jest wyprowadzony ze środka oporności zewnętrznej szczotek BD tj. ze środka uzwojeń wzbudzenia przyłączonych do szczotek BD.

Aby zapobiec powstaniu szkodliwego prądowego sprzężenia zwrotnego wytworzonego przez wyjściowy prąd obciążenia rozgałęziający się do symetrycznych połówek uzwojenia wzbudzenia na trzecim stopniu wzmocnienia, jest zastosowany specjalny dwupodział cewek uzwojenia wzbudzenia na trzecim stopniu i uzwojenia kompensacji podłużnej magnikonu. Polega on na podziale cewek uzwojenia kompensacji podłużnej magnikonu i uzwojenia wzbudzenia na dwie jednakowe cewki składowe, które są symetrycznie rozmieszczone po obu stronach zacisku wyjściowego. Przy takim połączeniu przepływy cewek wytworzone przez prąd wyjściowy wzmacniacza znoszą się, natomiast sumują się przepływy wzbudzenia (rys.5).

Trzeci stopnień wzmocnienia jest przeważnie wyposażony w magnetyczne dodatnie prądowe bądź napięciowe sprzężenie zwrotne, podobnie jak w rototrolu jednostopniowym bocznikowym bądź szeregowym. Na rys.5 uwidoczniono uzwojenie prądowego sprzężenia zwrotnego na trzecim stopniu wzmocnienia. Transmitancja wzmacniacza trójstopniowego z odbiornikiem czynno-indukcyjnym jest iloczynem transmitancji magnikonu i rototrola jednostopniowego.

Przy pominięciu wewnętrznych sprzężeń zwrotnych pierwszego i drugiego stopnia wzmocnienia oraz przy pominięciu prądu transformacji w obwodzie trzeciego stopnia wzmocnienia otrzymamy przy krytycznym prądowym sprzężeniu zwrotnym

$$\frac{I_o(p)}{U_s(p)} = \frac{\varkappa}{R_o} \frac{K_E}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + p\frac{T_o \varkappa T_3}{T_3 + T_o \varkappa})\, p(T_3 + \varkappa T_o)} \tag{7}$$



Rys.5. Schemat połączeń rototrola trójstopniowego

przy czym

$K_E = K_{u1} K_{u2} K_{E3}$ - współczynnik wzmocnienia napięcia wzmacniacza przy biegu jałowym,

T_1, T_2, T_3 - stałe czasowe obwodów wzbudzenia na trzech stopniach wzmocnienia

$R_o(1 + p T_o)$ - impedancja obciążenia wzmacniacza

$\varkappa$ - sprawność głównego obwodu na trzecim stopniu wzmocnienia.

5.2. Jednokomutatorowy wzmacniacz n - stopniowy

Podstawą budowy jest wzmacniacz o parzystej liczbie par biegunów, którego twornik posiada proste $2p_n$ - biegunowe, średnicowe uzwojenie pętlicowe bez połączeń wyrównawczych.

Wzmacniacz ten jest wykorzystany jako ostatni stopień wzmocnienia kaskady. Pole wzbudzenia ostatniego stopnia jest polem głównym determinującym stan nasycenia. Kąt geometryczny zawarty między sąsiednimi pieńkami biegunowymi $\alpha = \frac{2\pi}{2p_n}$ jest równy podziałce biegunowej na ostatnim stopniu wzmocnienia.

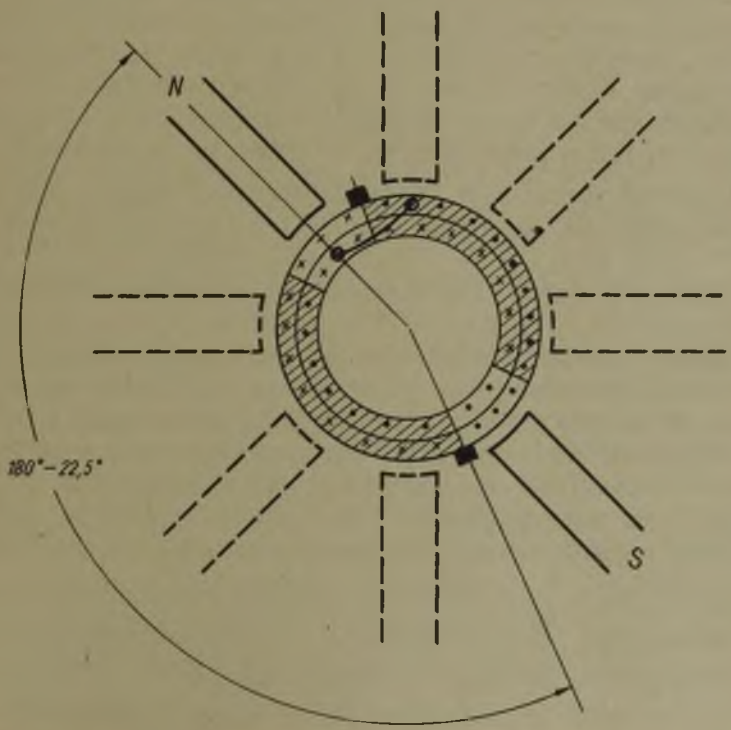
Wypadkowe pole wzbudzenia wstępnych stopni wzmocnienia o mniejszej liczbie par biegunów p_k jest nałożone na pole wzbudzenia stopnia końcowego. Maksymalna możliwa liczba pól wzbudzenia o różnych liczbach par biegunów w maszynie ($p_k = 1,2 \ldots p_n$) jest równa p_n. Niektóre spośród wyszczególniowych pól wzbudzenia mogą być niewykonalne. Są to pola wzbudzenia o takiej liczbie biegunów, przy której nie można zrealizować ich symetrycznego rozmieszczenia na obwodzie twornika. Z kolei każde $2p_k$ biegunowe pole wzbudzenia może być superpozycją przepływów wzbudzenia o osiach wzajemnie skręconych i przynależnych do wstępnych stopni wzmocnienia o tej samej liczbie par biegunów. Dla wstępnych stopni wzmocnienia o liczbie biegunów mniejszej od $2p_n$ uzwojenie twornika jest pętlicowe cięciwowe $2p_k$ - biegunowe.

Skrócenie poskoku uzwojenia wyrażone przy pomocy kąta geometrycznego wynosi $\beta_k = \pi(\frac{1}{p_k} - \frac{1}{p_n})$.

Spośród p_n par szczotek komutatora pracuje na każdym $2p_k$ biegunowym stopniu wzmocnienia p_k par szczotek. Szczotka dodatnia na tym stopniu wzmocnienia jest skręcona względem osi dodatniego pola wzbudzenia o kąt geometryczny

$\frac{\pi}{2p_k} + \frac{\beta_k}{2} = \pi\left(\frac{1}{p_k} - \frac{1}{2p_n}\right)$ w kierunku matematyczno dodatnim, a szczotka ujemna o kąt $\frac{\pi}{2p_n}$ w kierunku ujemnym przy zachowaniu umowy odnośnie sposobu przedstawienia uzwojeń i przyjętych kierunkowości [12].

Kąt skręcenia szczotki dodatniej na stopniu dwubiegunowym maszyny ośmiopieńkowej jest widoczny na rys.6. Kąt skręcenia szczotki dodatniej (względem osi pola wzbudzenia) można najprościej wyznaczyć kierując się znaną zasadą, że dodatni



Rys.6. Skręcenie szczotki dodatniej względem osi pola wzbudzenia przy skróconym uzwojeniu twornika

prąd twornika wytwarza oddziaływanie o osi elektrycznie poprzecznej względem osi pola wzbudzenia. Między parami szczotek przynależnych do pozostałych stopni wzmocnienia napięcie rotacji, wytworzone przez strumień wzbudzenia rozpatrywanego stopnia wzmocnienia, jest równe zeru.

Z rys.6 można łatwo zauważyć, że w maszynie ośmiopieńkowej oddziaływanie twornika wytwarza poprzeczny przepływ pod trzema kolejnymi nabiegunnikami. Pod nabiegunnikiem czwartym, przez który przenika pole wzbudzenia przepływ twornika powoduje dystorsję pola wzbudzenia. Jeżeli poprzeczny przepływ twornika ma zostać wykorzystany jako przepływ wzbudzenia następnego dwubiegunowego stopnia wzmocnienia, należy go skompensować pod dwoma niewykorzystanymi na tym stopniu pieńkami przy pomocy uzwojenia kompensacji poprzecznej.

Zasada budowy wstępnych stopni wzmocnienia jest następująca:

a) Poszczególne pieńki biegunowe są wykorzystane jako bieguny wyodrębnione na stopniach wstępnych,

b) Przepływ wzbudzenia każdego stopnia wzmocnienia ma symetryczne rozmieszczenie na obwodzie twornika. Pieńki biegunowe, wykorzystane w odnośnym stopniu wzmocnienia, są rozmieszczone symetrycznie na obwodzie twornika.
Kąt geometryczny zawarty pomiędzy sąsiednimi biegunami odnośnego stopnia wynosi $\alpha \frac{p_n}{p_k}$. Z uwagi na konieczność zachowania symetrii rozmieszczenia biegunów odnośnego stopnia na obwodzie twornika, są wykonalne tylko te stopnie wzmocnienia, dla których $\frac{p_n}{p_k}$ jest liczbą parzystą lub równą jedności.

c) Wstępne stopnie wzmocnienia występują parami. W każdej parze drugi stopień wzmocnienia posiada pole wzbudzenia wytworzone przez oddziaływanie twornika na stopniu poprzednim. Odsprzężenie między stopniami tej pary następuje przez skręcenie osi przepływów wzbudzenia o kąt elektryczny 90°, a względem pozostałych stopni wzmocnienia za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej. Uzwojenie kompensacji poprzecznej występuje tylko przy $\frac{p_n}{p_k} > 2$. Odsprzężenie między sąsiednimi parami następuje przez skręcenie osi przepływów wzbudzenia o kąt αp_k i za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej. Odsprzężenie między stopniami $2p_k$ i $2(p_k+1)$ biegunowymi następuje tylko za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej.

d) Łączna liczba stopni wzmocnienia m którą można zbudować w maszynie $2p_n$ pieńkach biegunowych

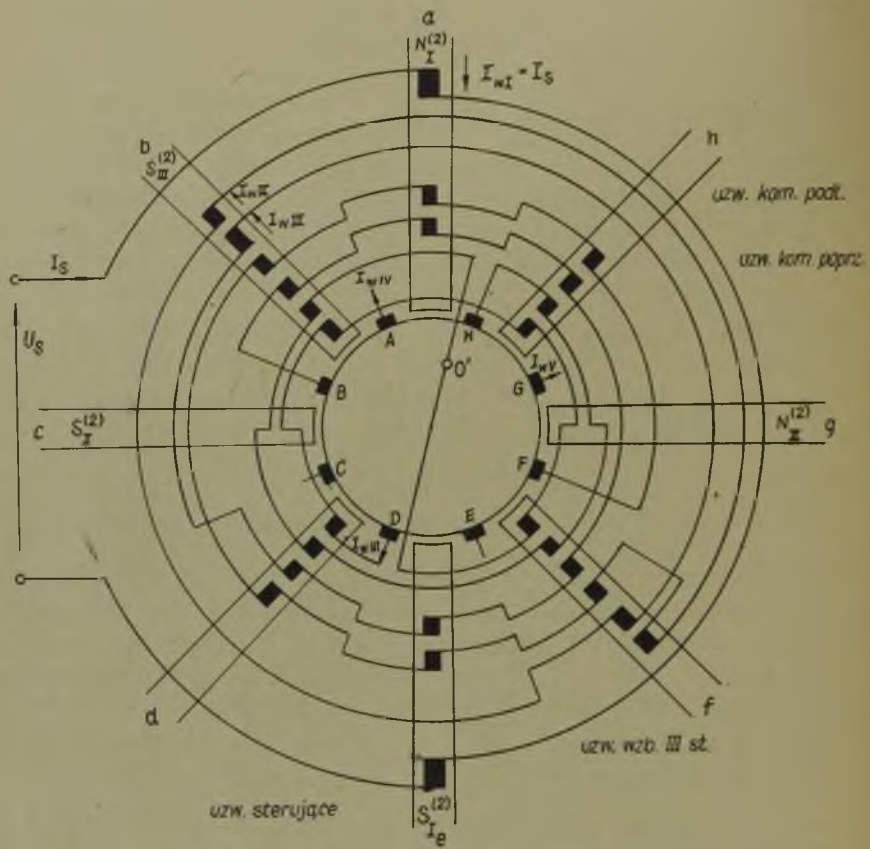
$$m = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{p_n}{p_k}\right)_{parz.}, \quad \text{lub } 1 \qquad (8)$$

przy czym p_n - liczba parzysta.

Zgodnie z uwagą b - uwzględniamy w powyższej sumie tylko składniki równe liczbie parzystej lub równe jedności. Poszczególne składniki $\frac{p_n}{p_k}$ oznaczają jednocześnie maksymalną liczbę możliwych stopni wzmocnienia dla określonej liczby par biegunów p_k na odnośnym stopniu wzmocnienia.
W szczególnym przypadku gdy liczba par pieńków biegunowych na ostatnim stopniu wzmocnienia p_n równa jest $p_n = 2^r$ (r - liczba naturalna) otrzymamy z równania (8) liczbę możliwych stopni wzmocnienia $m = 2p_n - 1$. Istnieją możliwości uzyskania większej względnej liczby stopni wzmocnienia $\underline{m} = \frac{m}{2p_n}$ przy innych wartościach p_n (np. przy $p_n = 12$ otrzymamy $\underline{m} = 25$).

Na rys.7 przedstawiono zasadę łączenia poszczególnych stopni wzmocnienia w maszynie 8-mio biegunowej. W maszynie tej można uzyskać 4 stopnie wzmocnienia o dwubiegunowym polu wzbudzenia ($N^{(1)}$ $S^{(1)}$ rys.a), dwa stopnie o czterobiegunowym polu wzbudzenia ($N^{(2)}$ $S^{(2)}$ - rys.b) i jeden stopień końcowy ośmiobiegunowy ($N^{(8)}$ $S^{(8)}$ - rys,c).

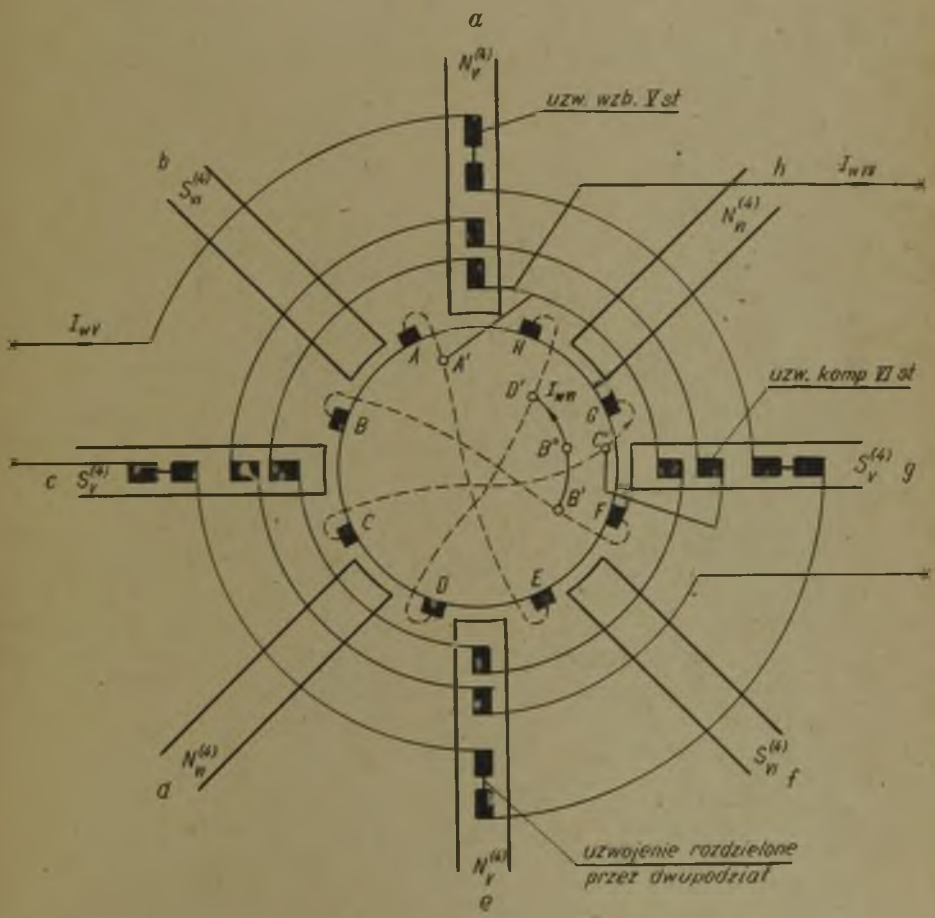
Dwubiegunowy okład prądu twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia, wytwarza dwubiegunowy przepływ wzbudzenia na drugim stopniu pod pieńkami c,g. Za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej przepływ jest zniesiony pod pieńkami f, h oraz b,d. Dwubiegunowy przepływ wzbudzenia na trzecim stopniu jest wytworzony przez uzwojenie wzbudzenia. Uzwojenie kompensacji podłużnej (na pieńkach a,b,d,e,f,h) na drugim stopniu wzmocnienia znosi oddziaływanie twornika, ponieważ jest ono przeciwnie skierowane do przepływu wzbudzenia na pierwszym stopniu. Środkowy punkt B' szczotek BF jest wyprowadzony za pomocą symetrycznego dwupodziału uzwojenia kompensacji na drugim stopniu i uzwojenia wzbudzenia na trzecim stopniu wzmocnienia połączonych w szereg.



Rys.7. Zasady łączenia poszczególnych stopni wzmocnienia na stopniach dwubiegunowych (a), na stopniach czterobiegunowych (b) i na stopniu ośmiobiegunowym (c)

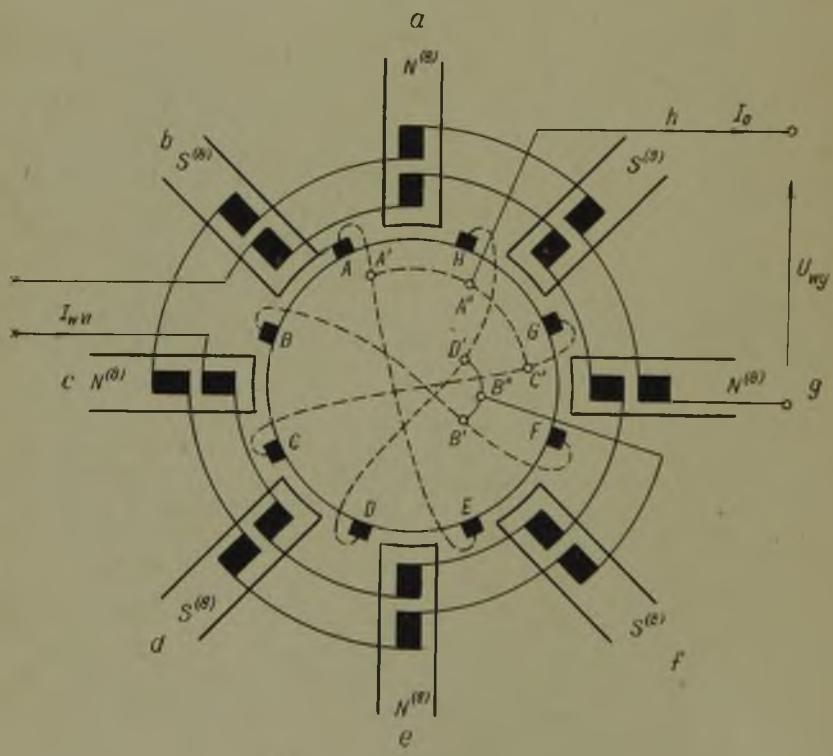
Czterobiegunowy przepływ twornika na piątym stopniu wzmocnienia jest wykorzystany jako przepływ wzbudzenia na stopniu szóstym. Punkty środkowe D′, B′ zewnętrznego obwodu szczotek DH oraz BF są zwarte. Linią przerywaną zaznaczono połączenia szczotek dokonane poprzez dwupodział uzwojenia wzbudzenia i kompensacji.

Jednotwornikowe wzmacniacze elektromaszynowe o liczbie stopni wzmocnienia większej od 3 nie znalazły większego zastosowania z powodu uczulenia wzmacniacza na wahania prędkości obrotowej oraz na działanie pasożytniczych wewnętrznych sprzężeń zwrotnych, których wpływ jest zwielokrotniony

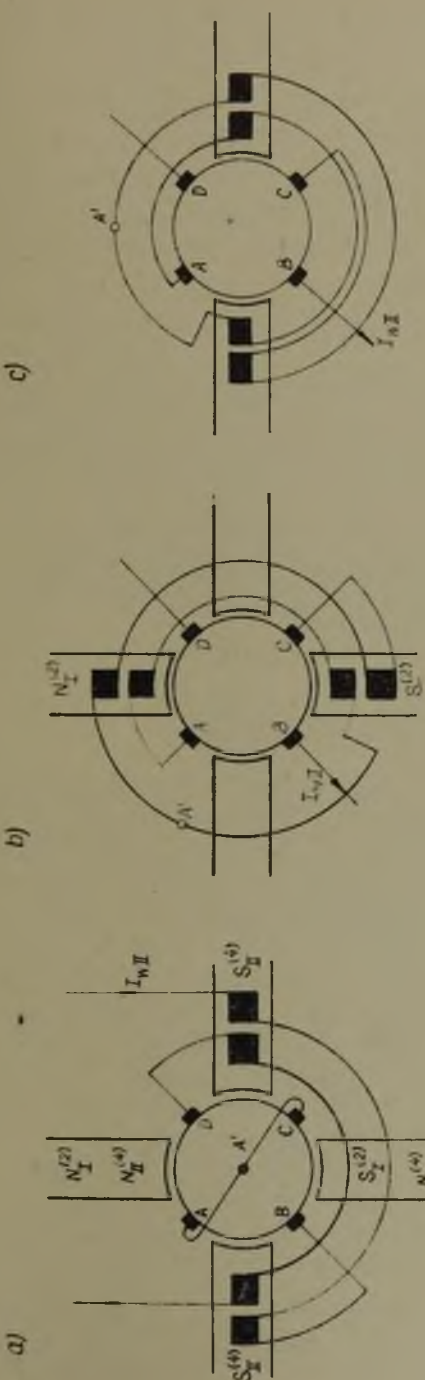


Rys. 7b

przy rosnącej liczbie stopni wzmocnienia. Z powodu braku połączeń wyrównawczych twornika już przy niewielkiej asymetrii szczelin powstają prądy wyrównawcze między jednoimiennymi szczotkami ostatniego stopnia wzmocnienia, które oddziałują na wstępne stopnie wzmocnienia dając efekt pasożytniczych sprzężeń zwrotnych. Oczywiście nie wszystkie możliwe do realizacji stopnie wzmocnienia muszą zostać wykorzystane w tym typie wzmacniacza. Na przykład w rototrolu dwustopniowym jest tylko jeden dwubiegunowy stopień wstępny obok ostatniego stopnia czterobiegunowego. W rototrolu dwustopniowym trzeba zlikwidować niepożądany wpływ oddziaływania twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia. Oddziaływanie twornika wytwarza bowiem pole poprzeczne indukujące prąd pasożytniczy w obwodzie zwartych szczotek. Prąd taki z kolei daje przepływ skierowany przeciwnie do przepływu uzwojenia sterują-



Rys.7c



Rys.8. Sposoby likwidowania ujemnego sprzężenia zwrotnego wytworzonego przez oddziaływanie twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia w rototrolu dwustopniowym za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej twornika na pierwszym stopniu wzmocnienia (a), za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej, kompensującego pasożytnicze oddziaływanie twornika wytworzone przez prąd w obwodzie szczotek zwartych (b), za pomocą uzwojenia opozycji (c)

cego powodując szkodliwy efekt ujemnego prądowego wewnętrznego sprzężenia zwrotnego. Szkodliwy wpływ oddziaływania twornika można zlikwidować trzema sposobami:

a) za pomocą uzwojenia kompensacji poprzecznej na pierwszym stopniu wzmocnienia (rys.8a) [6]

b) za pomocą uzwojenia kompensacji podłużnej kompensującego pasożytnicze oddziaływanie twornika wytworzone przez pasożytniczy prąd w obwodzie szczotek zwartych (rys.8b),

c) za pomocą uzwojenia opozycyjnego (rys.8c) [5]

W przypadku a) prąd pasożytniczy nie występuje, w przypadku b) występuje prąd pasożytniczy, jednakże jest skompensowany jego przepływ pasożytniczy, w przypadku c) przepływ pasożytniczy jest skompensowany i jednocześnie prąd pasożytniczy zmniejszony.

Możliwe są rowziązania kombinujące równocześnie wszystkie trzy rodzaje uzwojeń wg a,b,c (przy zmniejszonej liczbie zwojów), przy których otrzymuje się minimum miedzi zużytej w tych uzwojeniach pomocniczych.

6. Bieguny komutacyjne

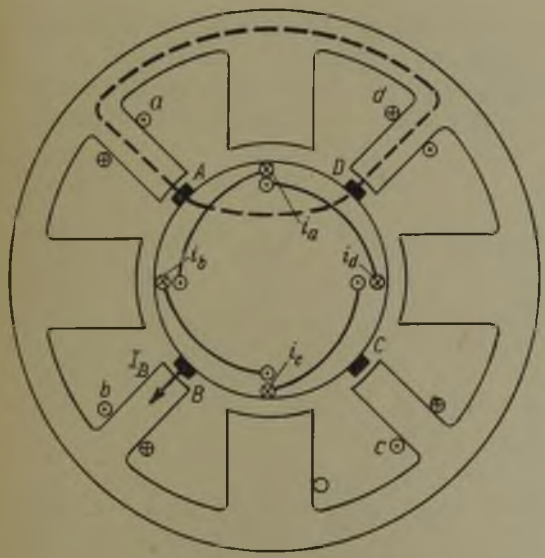
W przypadku amplidyn z rozszczepionymi biegunami komutacja prądu twornika na pierwszym i drugim stopniu wzmocnienia odbywa się w innych strefach międzybiegunowych. Wynika stąd możliwość wyposażenia amplidyny w oddzielne bieguny komutacyjne przeznaczone dla ułatwienia komutacji prądu twornika na pierwszym i drugim stopniu wzmocnienia. Z reguły rezygnujemy z biegunów komutacyjnych na stopniu pierwszym, ponieważ prąd poprzeczny twornika jest dużo mniejszy od prądu podłużnego (obciążenia) twornika. Komutacja beziskrowa prądu poprzecznego amplidyny nie nastręcza trudności. Obliczenie podłużnych biegunów komutacyjnych nie odbiega od podobnych obliczeń w zwykłych maszynach prądu stałego.

W przypadku amplidyn z biegunami wyodrębnionymi w każdej ze stref międzybiegunowej komutuje zarówno prąd podłużny jak i prąd poprzeczny twornika. Bieguny komutacyjne wpływają w tym przypadku zarówno na komutację prądu I_q i I_d jednocześnie. W konsekwencji bieguny komutacyjne muszą być we wszystkich czterech strefach międzybiegunowych a ich układ zasilania musi być taki, by zapewnić prawidłową komutację zarówno

prądu podłużnego jak i poprzecznego. Podobne zależności występują w przypadku wzmacniacza trójstopniowego. Przy obliczeniu prawidłowego rozwiązania zasilania biegunów komutacyjnych musimy uwzględnić, że zadaniem biegunów komutacyjnych jest wytworzenie przepływu Θ_{pk} potrzebnego do skompensowania wypadkowego oddziaływania twornika wytworzonego w strefie komutacyjnej oraz wytworzenie dodatkowego przepływu magnesującego Θ_{pm}, przy którym napięcia rotacji indukowane w zezwojach komutujących jest równe napięciu reaktywnemu.

Napięcie reaktywne jest równe SEM samoindukcji w zezwoju komutującym przy prostoliniowej komutacji. Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym przepływ Θ_{pm} jest proporcjonalny do łącznej zmiany prądu w żłobku zawierającym zezwoje komutujące.

Obliczenie przepływu magnesującego przeprowadzimy przy założeniu, że boki górne i dolne sąsiednich zezwojów komutujących leżą w tych samych żłobkach. Jest to założenie pokrywające się ze stanem rzeczywistym dla większości uzwojeń twornika, (Istnieje również możliwość skrócenia rozpiętości boków górnych i dolnych zezwoju o jeden żłobek, na skutek czego bok dolny zezwoju komutującego nie leży w tym samym żłobku co górny bok sąsiedniego zezwoju komutującego. W tym przypadku w zezwoju komutującym jest czynne napięcie reaktywne wytworzone tylko przez zmianę prądu komutowanego przez jedną szczotkę komutatora).



Rys.9. Strzałki kierunkowości prądów prętowych i przepływu biegunów komutacyjnych maszyny czteropieńkowej

Na rys.9 zaznaczono kierunkowości prądu górnej i dolnej warstwy wzwojenia twornika, kierunkowości przepływów biegunów komutacyjnych oraz kierunkowości prądu w szczotkach w maszynie czteropieńkowej. Zaznaczono również sposób połączenia górnego i dolnego boku

twornika w jeden zezwój. Dla obwodów magnetycznych maszyny zamykających się przez strefy komutacyjne możemy napisać prawo koła napięć magnetycznych, z którego otrzymamy relację wiążącą prądy w szczotkach i przepływy biegunów komutacyjnych. Jeśli wzmacniacz posiada rozłożone bądź skupione uzwojenie kompensacji obejmujące biegun komutacyjny musimy uwzględnić w bilansie przepływów poszczególnych obwodów magnetycznych również udział przepływu tych uzwojeń kompensacji. Przy założeniu, że wzmacniacz nie posiada rozłożonego uzwojenia kompensacji otrzymamy w przypadku maszyny z czterema pieńkami biegunowymi

$$\begin{aligned} \theta_{pkb} - \theta_{pka} &= (i_b - i_a)\,c, \\ \theta_{pkc} - \theta_{pkb} &= (i_c - i_b)\,c, \\ \theta_{pkd} - \theta_{pka} &= (i_d - i_c)\,c. \end{aligned} \tag{9}$$

Analogiczne równanie dla czwartego obwodu magnetycznego jest równaniem zależnym i dlatego zostało pominięte. Czwarte równanie określające wynika z warunku, by przepływ biegunów komutacyjnych nie wpłynął na strumień biegunów głównych

$$\theta_{pka} + \theta_{pkb} + \theta_{pkc} + \theta_{pkd} = 0. \tag{10}$$

Na mocy prawa Kirchhoffa

$$i_a + i_b + i_c + i_d = 0. \tag{11}$$

$$\theta_{kma} = \frac{k}{2}\left[(i_a - i_b) - (i_d - i_a)\right] = \frac{k}{2}(3\,i_a + i_c). \tag{12}$$

$$\theta_{kmb} = \frac{k}{2}(3i_b + i_d),$$

$$\theta_{kmc} = \frac{k}{2}(3i_c + i_a),$$

$$\theta_{kmd} = \frac{k}{2}(3i_d + i_b),$$

przy czym

k - współczynnik proporcjonalny do indukcyjności zezwojów komutujących i do długości szczeliny pod biegunem komutacyjnym.

$c = \frac{N}{8}$ - liczba prętów w warstwie uzwojenia twornika między sąsiednimi strefa komutacyjnymi.

Prądy prętowe występujące w równaniach określających przepływy biegunów komutacyjnych można wyrazić przy pomocy prądów szczotkowych. W ogólnym przypadku przepływ biegunów komutacyjnych jest wytworzony przez trzy prądy szczotkowe.

$$\begin{aligned} I_A &= i_a - i_b \\ I_B &= i_b - i_c \\ I_C &= i_c - i_d \\ I_D &= i_d - i_a \end{aligned} \tag{13}$$

$$\Theta_{pa} = \Theta_{pka} + \Theta_{pma} = -c\,\frac{3I_D + I_B}{4} + k\,(I_A - I_D) = c\,\frac{2I_D + I_A + I_C}{4} + k(I_A - I_D) \tag{14}$$

W szczególnym przypadku magnikonu biegun komutacyjny jest wyposażony tylko we dwa uzwojenia zasilane dwoma prądami szczotkowymi.

$$I_A = -I_C = I_d$$

$$I_B = -I_D = I_q$$

Stąd

$$\Theta_{pa} = (k + \frac{c}{2})(I_d + I_q) = (k + + \frac{c}{2})(I_A + I_B) \tag{15}$$

Również w rototrolu dwustopniowym biegun komutacyjny jest zasilany tylko dwoma prądami szczotkowymi.

Ponieważ bieguny komutacyjne dla dwóch stopni wzmocnienia, z których każdy wyposażony jest w dwa oddzielne uzwojenia są kłopotliwe i kosztowne, typ amplidyny z biegunami wyodrębnionymi, podobnie jak rototrol dwu i trójstopniowy znajduje przeważnie zastosowanie do wzmacniaczy małych mocy bądź wzmacniaczy o obniżonym okładzie prądowym, przy których można w ogóle obejść się bez biegunów komutacyjnych. Ponieważ strefy komutacyjne mieszczą się w łukach międzybiegunowych indukcyjność zezwojów komutujących jest zmniejszona, dzięki czemu można uzyskać beziskrową pracę szczotek. Oczywiście w takich wzmacniaczach bez biegunów komutacyjnych, komutacja zezwojów zwartych przez szczotkę jest opóźniona. Przy opóźnionej komutacji występuje oddziaływanie zezwojów komutujących, które powoduje powstanie wewnętrznego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza [11].

LITERATURA

[1] A n d r z e j e w s k i F.: Wielobiegunowe trójstopniowe wzmacniacze maszynowe Arch. Elektr. 3. 1959.

[2] G o g o l e w s k i Z, G a b r y ś W: Maszyny prądu stałego PWT 1960.

[3] L i w s c h i t z M.M.: The multistage rototrol AIEE Tr. 1947.

[4] L o o c k e G.: Elektrische Maschinenverstärker Springer Verlag, 1958.

[5] K i m b a l l A.W.: Two stage rototrol for law energy regulating systems AIEE 1947.

[6] P e ł c z e w s k i W.: Wzmacniacze elektromaszynowe PWT Warszawa 1959.

[7] P a s z e k W.: Projektowanie wzmacniaczy maszynowych z polem poprzecznym A.Aut. i Telem. 3-4/1957

[8] P a s z e k W.: Analiza stanów nieustalonych amplidyny Zesz.Nauk.Pol.Śl. Elektryka 4/1957.

[9] P a s z e k W.: Szczególne formy budowy wzmacniaczy maszynowych z polem poprzecznym. Rozpr. El,2/1959.

[10] P a s z e k W.: Analiza charakterystyk statycznych amplidyny Prz.El,5/1957.

[11] P a s z e k W.: Analiza i pomiary oddziaływania podłużnego zezwojów komutujących twornika w maszynie prądu stałego, w szczególności w amplidynie Arch.Aut. i Telem. 1-2/1957.

[12] P a s z e k W.: Zagadnienia konstrukcyjne i eksploatacyjne jednostopniowych wzmacniaczy elektromaszynowych Zesz.Nauk.Pol.Śl. Nr 12

[13] V a l e n t i n M.A.: L'amplidyne et ses applications Rev.El.Mec. 74/1940.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАШИННЫХ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Дана классификация одноякорных и многоякорных усилителей с одном и многими коммутаторами.

Усилители с одном коммутатором подразделены на конструкции с одинаковым и разным числом полюсов на очередных ступенях каскады.

Сравниваются конструкции. Анализируется цепь коммутационных полюсов.

LES PROPRIÉTÉS CONSTRUCTIVES DES AMPLIFICATEURS ROTATIFS À ÉTAGES MULTIPLES

L'auteur fait une classification des amplificateurs rotatifs à plusieurs étages, à ceux à un ou à plusieurs commutateurs. Les amplificateurs à un comutateur sont ensuite devisés d'après le nombre des pôles, qui peut être le même ou bien différent sur les étages succesifs.

On a comparé des constructions diverses des amplificateurs à étages multiples et on a analysé des circuits des pôles auxiliares.