

6.3.2.3. Stan dynamiczny

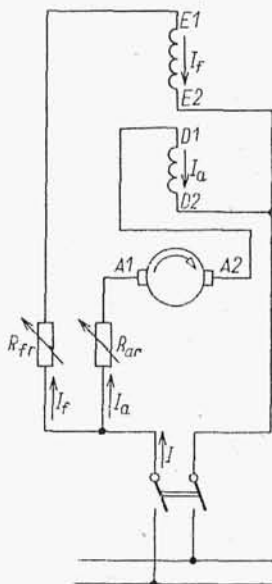
Dla stanów dynamicznych otrzymuje się z równań (6.152) równania przyrostowe w zapisie operatorowym

$$\begin{cases} \Delta U_{df}(s) = (R_{df}^s + L_{df}^s s) \Delta I_{df}^s(s) + M_{dfa} s \Delta I_a(s) \\ \Delta U_a(s) = (M_{dfa} s - G_{qdf}^{rs} \omega_0^r) \Delta I_{df}^s(s) + [(L_{da}^s + L_a^r) s + G_{qda}^{rs} \omega_0^r + \\ + (R_d^s + R_a^r)] \Delta I_a(s) + (G_{qda}^{rs} i_{a0} - G_{qdf}^{rs} i_{df0}^s) \Delta \Omega^r(s) \\ \Delta M^r(s) = (Js + D_r) \Delta \Omega^r(s) + (G_{qd}^{rs} i_{df0}^s - 2G_{qda}^{rs} i_{a0}) \Delta I_a(s) + G_{qdf}^{rs} i_{a0} \Delta I_{df}^s(s) \end{cases} \quad (6.156)$$

Układ równań (6.156), opisujący stany dynamiczne silnika szeregowo-bocznikowego prądu stałego, ma postać na tyle skomplikowaną, że uzyskanie z niego odpowiedzi na wymuszenie jest trudne. Wykorzystanie tego układu wymagałoby przyjęcia wielu uproszczeń, w związku z czym uzyskana odpowiedź byłaby obciążona błędem.

6.4. MASZYNA SZEREGOWO-BOCZNIKOWA

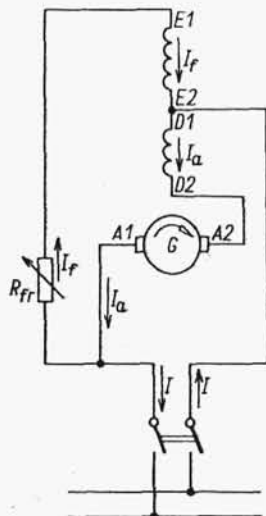
Maszyna szeregowo-bocznikowa prądu stałego może pracować jako silnik albo jako prądnica. Na rysunku 6.49 przedstawiono schemat ideowy silnika szeregowo-bocznikowego połączonego na współdziałanie przepływów. Oporniki regulacyjne R_{ar} i R_{fr} umożliwiają niezależną regulację napięcia doprowadzonego do twornika i do obwodu bocznikowego wzbudzenia. Z porównania schematów połączeń silnika obcowzbudnego z dozwojeniem szeregowym (rys. 6.47) i silnika szeregowo-bocznikowego widać, że przy jednakowych wartościach napięć doprowadzonych do obwodu twornika i do obwodu wzbudzenia silnik obcowzbudny z dozwojeniem sze-



Rys. 6.49. Schemat ideowy połączeń silnika szeregowo-bocznikowego

regowym jest identyczny z silnikiem szeregowo-bocznikowym. Wszystkie właściwości silnika obcowzbudnego z dozwojeniem szeregowym opisane w p. 6.3.1 odnoszą się także do silnika szeregowo-bocznikowego.

Schemat ideowy prądnicy szeregowo-bocznikowej połączonej na współdziałanie przepływów pokazano na rys. 6.50. Przy biegu jałowym nie płynie prąd



Rys. 6.50. Schemat ideowy połączeń prądnicy szeregowo-bocznikowej

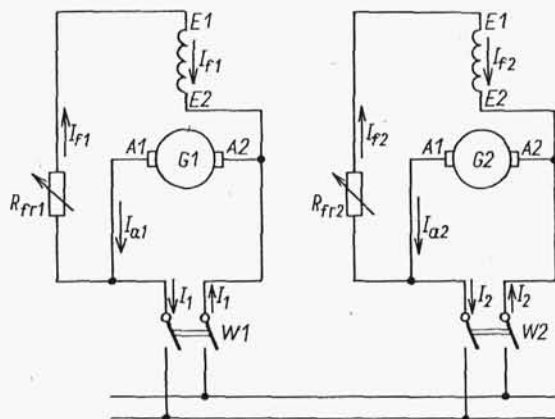
przez szeregowe uzwojenie wzbudające D1-D2 i prądnica szeregowo-bocznikowa zachowuje się tak, jak prądnica bocznikowa. Przy wzroście prądu obciążenia I (oraz prądu twornika I_a) wzrastają spadki napięcia na wewnętrznych rezystancjach prądnicy oraz zmniejsza się napięcie indukowane przez strumień wzniecony prądem I_f w bocznikowym uzwojeniu wzbudzącym na skutek reakcji twornika. Jednocześnie wzrasta jednak przepływ i strumień szeregowy wywołany prądem I_a płynącym przez szeregowe uzwojenie wzbudające D1-D2. Przy połączeniu prądnicy na współdziałanie przepływów przepływ wypadkowy ze wzrostem obciążenia nieco rośnie i napięcie na zaciskach prądnicy może zachować prawie stałą wartość. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy szeregowo-bocznikowej przebiegają podobnie do charakterystyk zewnętrznych prądnicy obcowzbudnej z dozwojeniem szeregowym pokazanych na rys. 6.44.

Z powodu zmian napięcia na zaciskach prądnicy ze zmianą obciążenia prądnicy szeregowo-bocznikowej rozpatrywanie charakterystyk tej prądnicy, a zwłaszcza jej charakterystyk dynamicznych na podstawie równań równowagi (6.138) jest utrudnione.

6.5. PRACA RÓWNOLEGLA PRĄDNIC PRĄDU STAŁEGO

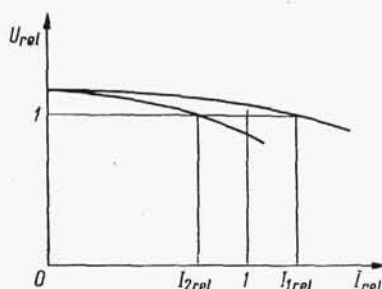
Schemat połączeń dwóch równolegle pracujących prądnic bocznikowych G1 i G2 dany jest na rys. 6.51. Można przyjąć, że jedna z tych prądnic, np. G1 jest już dołączona do wspólnych szyn zbiorczych i biegnie jałowo. Napięcie na szynach jest

równe napięciu znamionowemu U_N . Do szyn zbiorczych dołącza się prądnice $G2$. W tym celu doprowadza się (za pomocą silnika napędzającego) tę prądnice do prędkości obrotowej znamionowej, wzbudza się ją do napięcia U_N równego napięciu



Rys. 6.51. Schemat ideowy połączeń prądnic boczniowych prądu stałego do pracy równoległej

na szynach zbiorczych i sprawdza się jej biegunowość. Przy zgodnej biegunowości można zamknąć wyłącznik $W2$. Po zamknięciu tego wyłącznika $W2$ w dalszym ciągu jest $I_2 = 0$. Jeżeli do szyn zbiorczych zostaną dołączone odbiorniki, to prądnica zostanie obciążona. W przypadku, gdy obie prądnice mają identyczne charakterystyki zewnętrzne (w wartościach względnych), obciążenie szyn zbiorczych rozłoży się na poszczególne prądnice proporcjonalnie do ich mocy znamionowych. Jeżeli prądnice mają różne charakterystyki zewnętrzne, to obciążenie szyn zbiorczych rozłoży się na prądnice różnie, jak to przedstawiono na rys. 6.52. Obydwie prądnice mają na zaciskach takie samo napięcie. Jeżeli zmniejszą

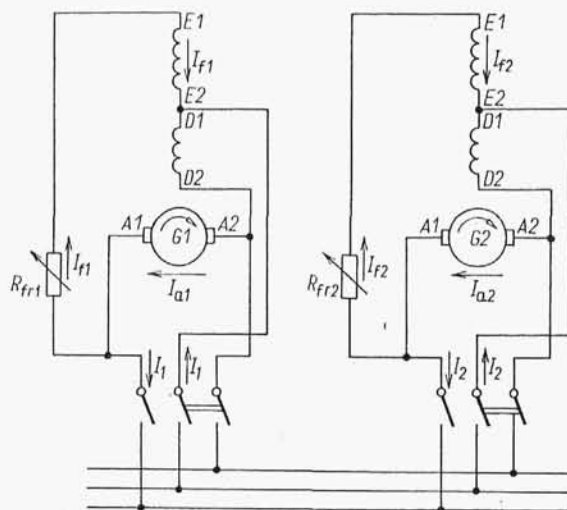


Rys. 6.52. Rozkład obciążeń między dwiema prądnicami pracującymi równolegle

się prąd wzbudzenia jednej z nich (np. $G1$), to prąd tej prądnicy zmniejsza się, a prąd drugiej prądnicy ($G2$) zwiększa się. Jednocześnie obniża się nieco napięcie na szynach zbiorczych. Jeśli zwiększa się prąd wzbudzenia jednej z prądnic (np. $G1$), to prąd jej rośnie, a prąd drugiej ($G2$) maleje i jednocześnie wzrasta nieco napięcie na szynach zbiorczych. Aby napięcie na szynach zbiorczych przy zmianach rozkładu

obciążen zachowało stałą wartość, należy zwiększyć prąd wzbudzenia tej prądnicy, której obciążenie ma wzrosnąć i odpowiednio zmniejszyć prąd wzbudzenia tej prądnicy, której obciążenie ma być zmniejszone.

Schemat ideowy połączeń do pracy równoległej prądnic szeregowo-bocznikowych (rys. 6.53) różni się od ideowego schematu połączeń do pracy równoległej



Rys. 6.53. Schemat ideowy połączeń prądnic szeregowo-bocznikowych prądu stałego do pracy równoległej

prądnic bocznikowych tym, że dodany jest przewód wyrównawczy, łączący zaciski $D2$ prądnic $G1$ i $G2$, tj. końcówki uzwojeń szeregowych, którymi te uzwojenia przyłączone są do uzwojeń twornika. Gdyby tego połączenia nie było i gdyby z jakiegokolwiek przyczyny zewnętrznej napięcie indukowane w jednej z prądnic, np. $G1$, zostało zwiększone, to natychmiast popłynąłby przez nią większy prąd. Prąd ten, płynąc przez uzwojenie szeregowe tej prądnicy, zwiększałby w dalszym ciągu indukowane w niej napięcie, co z kolei zwiększałoby znowu jej prąd itd. aż do całkowitego przejęcia obciążenia przez tę prądnicę. Prądnica $G2$ byłaby odciążona. Widać stąd, że stan równowagi przy współpracy prądnic szeregowo-bocznikowych bez przewodu wyrównawczego jest stanem równowagi niestabilnej, z którego prądnice mogą być łatwo wytrącone i do którego samoczynnie już nie wracają. Jeżeli natomiast prądnice zostaną połączone przewodem wyrównawczym, to na skutek zwiększonego chwilowo napięcia indukowanego w prądnic $G1$, płynący przez nią zwiększony prąd rozłoży się w punkcie $D2$ prądnicy $G1$ na równoległe połączone rezystancje uzwojeń szeregowych $D1$ - $D2$ prądnic $G1$ i $G2$. Zwiększy to szeregowy przepływ obu prądnic, powodując zwiększenie indukowanych napięć i jednocześnie zwiększenie prądów obciążających. Widać stąd, że równowaga współpracy prądnic szeregowo-bocznikowych, połączonych przewodem wyrównawczym, nie zostanie zachwiana. Ten stan równowagi można nazwać stanem równowagi stabilnej.

Drugą cechą odróżniającą omawiany schemat od schematu współpracy równoległej prądnic bocznikowych jest to, że jeden biegun każdej prądnicy (nie połączony z uzwojeniem szeregowym) jest przyłączony do szyn zbiorczych za pomocą wyłącznika jednobiegunowego. Przy zastosowaniu bowiem wyłącznika sprzężonego dla wszystkich zacisków, w chwili przyłączenia np. prądnicy G_2 do szyn zbiorczych, na które już pracuje obciążona prądnica G_1 , uzwojenia szeregowie obu maszyn zostałyby połączone ze sobą równolegle. Na skutek tego prąd twornika prądnicy G_1 rozdzieliłby się pomiędzy uzwojenia szeregowie obu prądnic. Zatem prądnica G_2 zostałaby gwałtownie dowzbudzona, co spowodowałoby gwałtowny wzrost jej obciążenia, czyli gwałtowny wzrost momentu hamującego. Wyłączniki dwubiegunowe są natomiast zastosowane do połączenia końcówek uzwojeń szeregowych $D1-D2$, jednych z szyną zbiorczą, a drugich z przewodem wyrównawczym.

Przy włączaniu G_2 na wspólne z G_1 szyny zbiorcze należy najpierw zamknąć wyłącznik dwubiegunowy. Wtedy część prądu twornikowego prądnicy G_1 popłynie również przez uzwojenie szeregowie prądnicy G_2 , wskutek czego ulegnie zmianie wartość napięcia indukowanego w G_2 . Należy więc za pomocą opornika regulacyjnego R_{fz2} w obwodzie bocznikowym prądnicy G_2 tak wyregulować wartość indukowanego w niej napięcia, żeby było ono równe wartości napięcia na szynach. Następnie zamyka się wyłącznik jednobiegunowy. Wtedy nie nastąpi zmiana rozprywu prądów przez uzwojenie szeregowie obu prądnic i wskutek tego prądnica G_2 nie zostanie obciążona. Przenieść obciążenie na G_2 można — podobnie, jak w prądnicach bocznikowych — przez zwiększenie prądu wzbudzenia bocznikowego prądnicy G_2 przy jednoczesnym zmniejszeniu prądu wzbudzenia bocznikowego prądnicy G_1 . Napięcie na szynach nie zmieni się przy tym. Tak więc przewód wyrównawczy i jednobiegunowe wyłączniki zapewniają prawidłowy przebieg współpracy równoległej prądnic szeregowo-bocznikowych.

Przed przyłączeniem drugiej prądnicy do szyn zbiorczych, podobnie jak w przypadku pracy równoległej prądnic bocznikowych, trzeba ją odpowiednio wzbudzić oraz sprawdzić jej biegunowość. Przy czym, jeśli biegun dodatni prądnicy jest przyłączony do wyłącznika, do którego jest przyłączona szyna ujemna, to należy zmienić biegunowość prądnicy, lecz w tym przypadku nie można tego robić przez zmianę przewodów łączących prądnice z biegunami wyłączników. Wówczas bowiem uzwojenia szeregowie prądnic byłyby połączone ze sobą nie równolegle, lecz szeregowo i przewód wyrównawczy zwierałby szyny zbiorcze przez niewielką rezystancję tych uzwojeń. W takim przypadku zmiany biegunowości można dokonać przez przemagnesowanie prądnicy albo przez zmianę kierunku wirowania i jednocześnie przełączenie uzwojenia bocznikowego (zamiana końcówek $E1-E2$).

6.6. MASZYNA ZE WZBUDZENIEM MAGNETOELEKTRYCZNYM

Maszyną prądu stałego ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym albo z magnesami trwałymi nazywa się maszynę prądu stałego, w której strumień wzbudzenia jest

wywołany magnesami trwałymi. Zasadę powstawania strumienia od magnesów trwałych opisano w p. 3.6.2. Magnesy trwałe wywołują w danej maszynie przy jej biegu jałowym strumień o stałej wartości podobnie do strumienia magnetycznego wywołanego prądem wzbudzenia i_f o stałej wartości, płynącego w podłużnym uzwojeniu stojana w maszynie ze wzbudzeniem elektromagnetycznym obcym.

Przy kształcie nabiegunników magnesów trwałych podobnym do kształtu nabiegunników biegunów z uzwojeniem wzbudzającym rozkład indukcji od magnesów trwałych na obwodzie maszyny jest podobny do rozkładu indukcji podanego na rys. 3.57, a rozkład indukcji wypadkowej w maszynie obciążonej jest podobny do rozkładu podanego na rys. 3.82.

Z pewnym przybliżeniem maszyna prądu stałego ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym może być traktowana jak maszyna obcowzbudna ze stałym prądem wzbudzenia. Przy takim uproszczeniu prosta KM na rys. 3.54 jest prostą równoległą do osi odciętych. Dla takiego przypadku na podstawie układu równań (6.1) otrzymuje się równania równowagi maszyny ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym

$$\left. \begin{aligned} u_a^r &= -c\omega^r + (R_a^r + L_a^r s) i_a^r \\ M^r &= (Js + D_r) \omega^r + M_e \end{aligned} \right\} \quad (6.157)$$

przy czym moment elektromagnetyczny

$$M_e = c i_a^r \quad (6.158)$$

Równania dla stanu ustalonego mają postać

$$\left. \begin{aligned} u_{a0}^r &= -c\omega_0^r + R_a^r i_{a0}^r \\ M_0^r &= D_r \omega_0^r + c i_{a0}^r \end{aligned} \right\} \quad (6.159)$$

a równania dla przyrostów w zapisie operatorowym mają postać

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_a^r(s) &= -c\Delta\Omega^r(s) + (R_a^r + L_a^r s) \Delta I_a^r(s) \\ \Delta M^r(s) &= (Js + D_r) \Delta\Omega^r(s) + c\Delta I_a^r(s) \end{aligned} \right\} \quad (6.160)$$

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym określona pierwszym równaniem układu (6.159) przy $\omega_0^r = \text{const}$ jest podobna do charakterystyki zewnętrznej prądnicy obcowzbudnej określonej równaniem (6.9) i pokazanej na rys. 6.4 przy $u_{a0\text{rel}}^r = 1$.

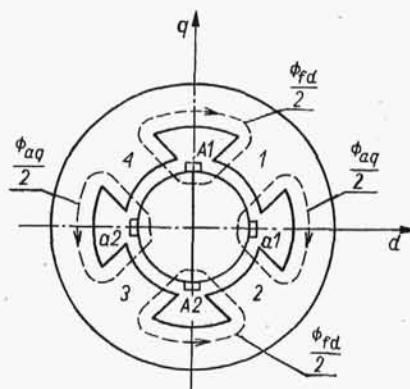
Przy nagłej zmianie rezystancji odbiornika określonej wzorami (6.28) i (6.29) równanie więzów jest określone równaniem (6.30). Z tego równania więzów i pierwszego równania układu (6.160) otrzymuje się przybliżone równanie przyrostów, jak równanie (6.31). Przy oznaczeniu stałej czasowej jak we wzorze (6.32) otrzymuje się transmitancję operatorową (odpowiadającą członowi inercyjnemu pierwszego rzędu) określoną wzorem (6.33), transformatę przyrostu prądu określoną wzorem (6.35) i przyrost prądu twornika określony wzorem (6.36). Przy takich uproszczeniach charakterystyki statyczne i dynamiczne prądnicy prądu stałego ze wzbudzeniem magneto-elektrycznym są identyczne z odpowiednimi charakterystykami prądnicy obcowzbudnej.

Maszyna ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym może także pracować w zakresie pracy silnikowej. Silnik prądu stałego ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym może być w przybliżeniu traktowany jak silnik obcowzbudny o stałej wartości napięcia wzbudzenia. Równaniami równowagi są równania układu (6.157), moment elektromagnetyczny jest określony równaniem (6.158), równaniami dla stanu ustalonego są równania układu (6.159), a równaniami przyrostowymi dla stanu dynamicznego są równania układu (6.16). Równaniami więzów są przy regulacji przez zmianę napięcia wirnika trzy ostatnie równania układu (6.38), przez zmianę momentu trzy ostatnie równania układu (6.39), a przy regulacji przez zmianę rezystancji wirnika trzy ostatnie równania układu (6.40). Charakterystyki silnika ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym w stanie ustalonym odpowiadają charakterystykom silnika obcowzbudnego w stanie ustalonym, opisanym w p. 6.2.3.2 przy $u_{d0} = \text{const.}$ Stanowi dynamicznemu silnika ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym odpowiada stan dynamiczny silnika obcowzbudnego, opisany w p. 6.2.3.3 przy $u_d = \text{const.}$

6.7. MASZYNA Z WYKORZYSTANIEM STRUMIENIA POPRZECZNEGO

6.7.1. Wiadomości ogólne

Zasadę działania maszyny z wykorzystaniem strumienia poprzecznego wyjaśnia rys. 6.54. Maszyna ma cztery, bieguny, ale strumień wywołany np. prądem w uzwojeniach magnesów magnesuje dwa z nich (np. 1 i 2) w jednym kierunku, a pozostałe

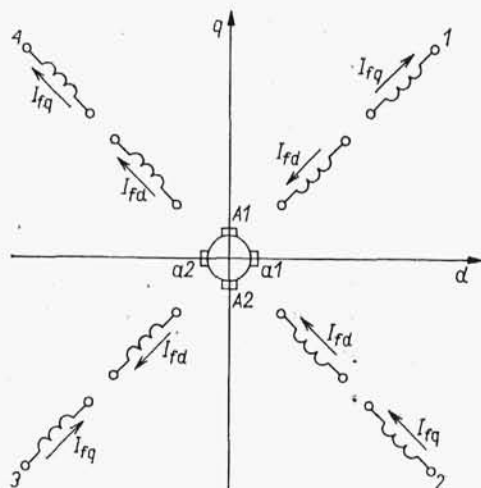


Rys. 6.54. Zasada działania maszyny z wykorzystaniem pola poprzecznego

dwa (np. 3 i 4) w drugim kierunku. Jest to więc w rzeczywistości maszyna dwubiegunkowa i twornik jej jest uzwojony na dwa bieguny. Strumień Φ_{fd} wzniesiony przez bieguny przebiega jak pokazano na rys. 6.54. W osi poprzecznej q względem tego strumienia znajdują się szczotki poprzeczne A1-A2. Przy zwartych szczotkach A1-A2 płynie przez uzwojenie twornika prąd, który wywołuje strumień Φ_{aq} skierowany w osi q , jak strumień reakcji poprzecznej twornika. Napięcie w obwodzie poprzecznym twornika na szczotkach A1-A2, indukowane przez strumień Φ_{aq} jest równe zeru.

Strumień Φ_{aq} indukuje napięcie w obwodzie podłużnym twornika na szczotkach $a1-a2$ ustawionych w osi d . Jest to więc maszyna z wykorzystaniem pola poprzecznego. Szczotki $A1-A2$ i $a1-a2$ muszą być ustawione w miejscu, w którym szczelina powietrzna jest duża (dla polepszenia komutacji). Dlatego biegun musi być podzielony na dwie części. W rzeczywistości maszyny te najczęściej nie mają jawnych biegunów a wszystkie uzwojenia stojana są umieszczone w odpowiednio ukształtowanych żłobkach blach stojana.

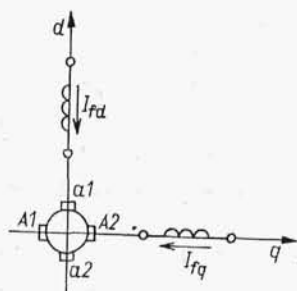
Strumień podłużny Φ_{fd} jest wniecony przez prąd I_{fd} płynący w odpowiednim uzwojeniu stojana. Strumień Φ_{aq} może być wzbudzony nie tylko przez prąd płynący przez twornik przy zwarcu szczotek $A1-A2$, lecz także przez prąd I_{fq} płynący przez uzwojenie umieszczone na magnesach tak, że bieguny 2 i 3 są magnesowane w jednym kierunku, a bieguny 1 i 4 w drugim kierunku. Wtedy uzwojenia



Rys. 6.55. Uzwojenia wzbudzające maszyny z wykorzystaniem pola poprzecznego

wzbudzające są rozłożone jak na rys. 6.55, a strumienie wniecone w tych uzwojeniach mają kierunki zgodne ze strzałkami przy prądach na rys. 6.56.

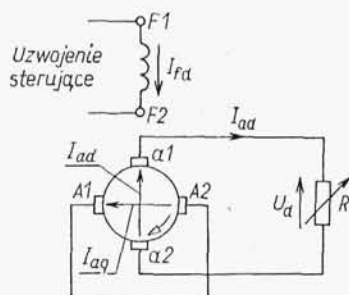
Strumień Φ_{fd} od prądu I_{fd} indukuje w obwodzie poprzecznym twornika (szczotki $A1-A2$) napięcie U_{iq} . Przy zwartych szczotkach $A1-A2$ płynie w obwodzie



Rys. 6.56. Kierunki działania strumieni od uzwojeń wzbudzających w maszynie z wykorzystaniem pola poprzecznego

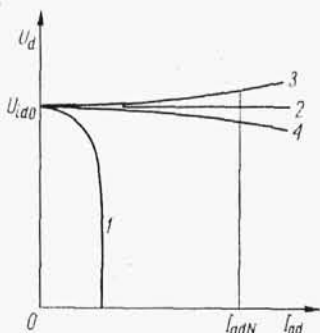
twornika prąd poprzeczny I_{aq} , od którego powstaje strumień poprzeczny twornika Φ_{aq} . Strumień ten osiąga dużą wartość, ponieważ permeancja jest duża także w osi q . Strumień Φ_{aq} indukuje w obwodzie podłużnym twornika (szczotki $a1-a2$) napięcie U_{id} . Pod wpływem tego napięcia płynie prąd I_{ad} w podłużnym obwodzie twornika i w obwodzie zewnętrznym. W ten sposób powstaje maszyna dwustopniowa: obwód podłużny w stanie jest obwodem wzbudzającym dla obwodu poprzecznego twornika, który z kolei jest obwodem wzbudzającym dla obwodu podłużnego twornika.

Najprostszą maszyną z wykorzystaniem pola poprzecznego jest *metadyna*, której schemat połączeń pokazano na rys. 6.57. Uzwojenie wzbudzące w maszynach z wykorzystaniem pola poprzecznego jest nazywane uzwojeniem sterującym. Podłużny prąd twornika I_{ad} wywołuje strumień podłużny twornika Φ_{ad} skierowany



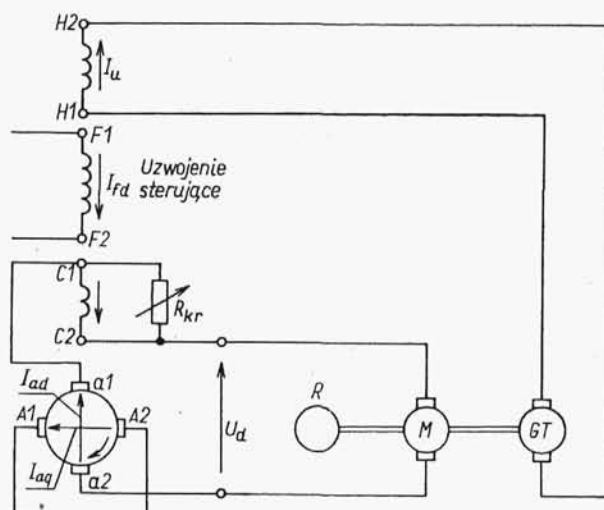
Rys. 6.57. Schemat połączeń metadyny

przeciwnie do strumienia podłużnego wzbudzenia Φ_{fd} , a więc strumień rozmagne-sowujący. Dlatego wzrost prądu I_{ad} powoduje duży spadek napięcia indukowanego w podłużnym obwodzie twornika U_{id} i napięcia na zaciskach U_d . Charakterystykę zewnętrzną $U_d = f(I_{ad})$ pokazuje krzywa 1 na rys. 6.58. Metadyna jest maszyną na praktycznie stałą wartość prądu, niezależną od wartości rezystancji odbiornika R_{od} . Przez zmianę prądu sterującego I_{fd} można zmieniać wartość prądu I_{ad} , czyli odpowiednio przesuwając charakterystykę zewnętrzną. Oprócz omówionych uzwojeń maszyna z wykorzystaniem pola poprzecznego ma także uzwojenia komutacyjne dla każdej pary szczotek.



Rys. 6.58. Charakterystyki zewnętrzne metadyny i amplidyny

Na rysunku 6.59 pokazano schemat połączeń amplidyny. *Amplidyna* jest również maszyną z wykorzystaniem pola poprzecznego, a od metadyny różni się przede wszystkim tym, że ma w osi podłużnej uzwojenie kompensacyjne C1-C2 połączone w szereg z podłużnym obwodem twornika a1-a2. Przepływ uzwojenia kompensacyjnego wywołany prądem I_{ad} jest skierowany przeciwko przepływowi podłużnemu twornika, a więc kompensuje przepływ podłużny twornika.



Rys. 6.59. Schemat połączeń amplidyny

Przy idealnym skompensowaniu przepływu podłużnego twornika napięcie indukowane w obwodzie podłużnym twornika U_{id} byłoby równe napięciu U_{id0} indukowanemu w tym obwodzie w stanie otwartym. Przy pominięciu spadku napięcia $R_{ad} I_{ad}$ na rezystancji obwodu podłużnego twornika napięcie na zaciskach zewnętrznych U_d byłoby niezależne od prądu I_{ad} (prosta 2 na rys. 6.58). Gdyby przepływ uzwojenia kompensacyjnego był większy od przepływu podłużnego twornika, ze wzrostem prądu I_{ad} następowałoby domagnesowanie amplidyny i zależność $U_d = f(I_{ad})$ miałaby przebieg rosnący (krzywa 3 na rys. 6.58). Taka praca amplidyny jest niedopuszczalna, ponieważ oznacza samoczynne dowzbudzenie się maszyny aż do jej uszkodzenia. Dlatego przepływ kompensacyjny jest nieco mniejszy od przepływu podłużnego twornika, a charakterystyka zewnętrzna amplidyny przebiega jak krzywa 4 na rys. 6.58, czyli podobnie do charakterystyki zewnętrznej prądnicy obcowzbudnej i bocznikowej. Dla dokładnego ustalenia wartości przepływu kompensującego uzwojenie kompensacyjne jest zbocznikowane przez regulowaną rezystancję R_{kr} . Współczynnik wzmocnienia amplidyny

$$k = \frac{U_d I_{ad}}{U_{fd} I_{fd}} \quad (6.161)$$

oznacza stosunek mocy na wyjściu z amplidyny (na zaciskach zewnętrznych obwodu podłużnego twornika) do mocy sterującej (na zaciskach uzwojenia podłużnego wzbudzającego). Stosunek ten można wyrazić iloczynem

$$k = k_1 k_2$$

przy czym

$$k_1 = \frac{U_{iq} I_{aq}}{U_{fd} I_{fd}}$$

$$k_2 = \frac{U_d I_{ad}}{U_{iq} I_{aq}}$$

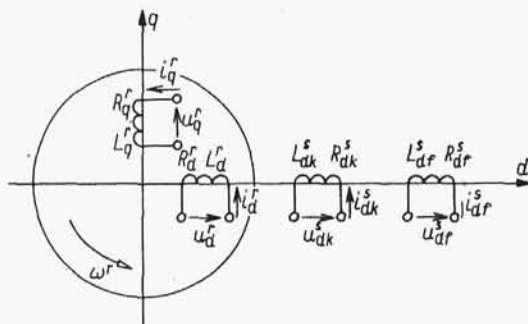
Każdy ze współczynników k_1 i k_2 oznacza stosunek mocy na wyjściu z danego stopnia maszyny do mocy wzbudzenia tego stopnia a współczynnik k jest współczynnikiem dwustopniowego wzmocnienia mocy. Amplidyna bywa często nazywana *wzmacniaczem dwustopniowym* (za jednostopniowy wzmacniacz może być uważana np. każda prądnica prądu stałego). Wartość każdego ze współczynników k_1 i k_2 może dochodzić do 50, więc wartość k może dochodzić do 2500. Zwykle amplidyny mają współczynnik wzmocnienia mocy $k = 500 \div 1000$. Duży współczynnik uzwojenia mocy amplidyny jest jej zasadniczą zaletą, gdyż dzięki temu bardzo małą mocą uzwojenia sterującego można sterować dużą moc na wyjściu. Drugą zaletą jest łatwość stosowania amplidyny w układach zautomatyzowanych, dzięki stosowaniu sprzężeń zwrotnych. Na rysunku 6.59 uzwojeniem sprzężenia zwrotnego napięciowego jest uzwojenie $H1-H2$. Amplidyna według tego schematu połączeń zasila silnik obcowzbudny M napędzający maszynę roboczą R . Z silnikiem M jest sprzężona prądnica tachometryczna GT o napięciu proporcjonalnym do prędkości. Prądnica GT zasila uzwojenie ujemnego sprzężenia zwrotnego $H1-H2$ o przepływie skierowanym przeciwko przepływowi sterującemu $F1-F2$. Jeśli z jakiegokolwiek powodu zmniejsza się prędkość obrotowa silnika M , to zmniejsza się napięcie na prądnicie tachometrycznej, zmniejsza się przepływ rozmagnesowujący uzwojenia sprzężenia zwrotnego, wzrasta napięcie na amplidynie i na silniku M i rośnie prędkość silnika do wartości początkowej. Zaletą amplidyny są także jej małe stałe czasowe, co pozwala na szybkie dojście do stanu statycznego po zakłóceniu. Obecnie, wobec szerokiego stosowania wzmacniaczy energoelektronicznych, zastosowanie metadyny i amplidyny w nowoczesnych układach jest niewielkie.

6.7.2. Równania równowagi

Na rysunku 6.60 dany jest model maszyny z dwoma uzwojeniami w osi podłużnej stojana. Równania równowagi tej maszyny dla bram elektrycznych mają postać

$$\begin{bmatrix} u_{df}^s \\ u_{dk}^s \\ u_d^r \\ u_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f^s + L_f^s s & M_{fk}^s & M_{fd}^s & 0 \\ M_{fk}^s & R_{dk}^s + L_{dk}^s s & M_{kd}^s & 0 \\ M_{df}^s & M_{kd}^s & R_d^r + L_d^r s & G_{dq}^{rr} \omega^r \\ -G_{qf}^{rs} \omega^r & -G_{qk}^{rs} \omega^r & -G_{qd}^{rr} \omega^r & R_q^r + L_q^r s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{df}^s \\ i_{dk}^s \\ i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} \quad (6.162)$$

przy czym: M_{fk} – indukcyjność wzajemna między uzwojeniem df i uzwojeniem dk stojana; M_{fd} – indukcyjność wzajemna między uzwojeniem df stojana i uzwojeniem d wirnika; M_{kd} – indukcyjność wzajemna między uzwojeniem dk stojana i uzwojeniem d wirnika; G_{dq}^{rr} – indukcyjność rotacji dla napięcia rotacji indukowa-



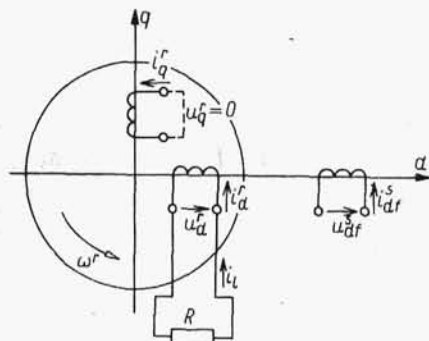
Rys. 6.60. Model maszyny prądu stałego z wykorzystaniem pola poprzecznego

nego w uzwojeniu d wirnika od prądu w uzwojeniu q wirnika; G_{qf}^{rs} – indukcyjność rotacji dla napięcia rotacji indukowanego w uzwojeniu q wirnika od uzwojenia df stojana; G_{qd}^{rr} – indukcyjność rotacji dla napięcia rotacji indukowanego w uzwojeniu q wirnika od prądu w uzwojeniu d wirnika; pozostałe oznaczenia jak na rys. 6.60.

6.7.3. Metadyna

Metadyna ma w wirniku uzwojenie poprzeczne i podłużne, a w stojanie tylko jedno uzwojenie w osi podłużnej, przy czym uzwojenie poprzeczne wirnika jest zwarte (rys. 6.61). Równania równowagi dla bram elektrycznych modelu z rys. 6.61 mają postać

$$\left. \begin{aligned} u_{df}^s &= (R_f^s + L_f^s s) i_{df}^s + M_{fd} s i_d^r \\ u_d^r &= M_{df} s i_{df}^s + (R_d^r + L_d^r s) i_d^r + G_{dq}^{rr} \omega^r i_q^r \\ 0 &= -G_{qf}^{rs} \omega^r i_{df}^s - G_{qd}^{rr} \omega^r i_d^r + (R_q^r + L_q^r s) i_q^r \end{aligned} \right\} \quad (6.163)$$



Rys. 6.61. Model metadyny

Równania równowagi dla bram elektrycznych w stanie ustalonym mają postać

$$\left. \begin{aligned} u_{df0}^s &= R_f^s i_{df0}^s \\ u_{d0}^r &= R_d^r i_{d0}^r + G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{q0}^r \\ 0 &= -G_{qf}^{rs} \omega_0^r i_{df0}^s - G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{d0}^r + R_q^r i_{q0}^r \end{aligned} \right\} \quad (6.164)$$

skąd

$$\frac{-i_{d0}^r}{u_{df0}^s} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_f^s \left[-\frac{u_{d0}^r}{i_{d0}^r} R_q^r + R_q^r R_d^r + G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2 \right]} \quad (6.165)$$

oraz

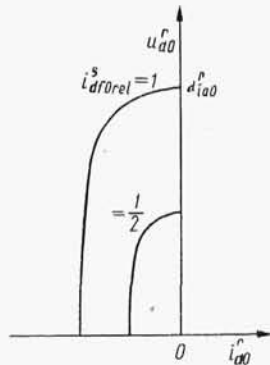
$$u_{d0}^r = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{df0}^s + \frac{R_q^r R_d^r + G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{d0}^r \quad (6.166)$$

W prądnicy obcowzbudnej zgodnie ze wzorem (6.9) dodatniemu napięciu wzbudzenia u_{df0}^s (prądowi wzbudzenia i_{df0}^s) odpowiada ujemne napięcie u_{q0}^r na obwodzie poprzecznym twornika. W tym stanie prąd twornika ma wartość dodatnią. W metadynie na skutek dwukrotnego przetwarzania napięcia rotacji zgodnie ze wzorem (6.166) dodatniemu napięciu wzbudzenia u_{df0}^s (prądowi wzbudzenia i_{df0}^s) odpowiada dodatnie napięcie u_{d0}^r na obwodzie podłużnym twornika. W stanie pracy prądnicowej metadyny prąd i_{d0}^r w podłużnym obwodzie wirnika (twornika), równy prądowi linii i_{l0} , ma wartość ujemną.

Zależność (6.166) opisuje przebieg charakterystyk zewnętrznych metadyny (rys. 6.62). Przy biegu jałowym ($i_{d0}^r = 0$) napięcie indukowane w tworniku metadyny

$$u_{id0}^r = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{df0}^s \quad (6.167)$$

jest równe napięciu biegu jałowego. Ze wzrostem prądu obciążenia i_{d0}^r o wartości ujemnej drugi człon we wzorze (6.166) powoduje gwałtowne zmniejszenie się napięcia. Fizycznie oznacza to znaczne zmniejszenie strumienia magnetycznego wywołane



Rys. 6.62. Charakterystyki zewnętrzne metadyny

rozmagnesowującym strumieniem od podłużnego strumienia twornika skierowanym przeciwko strumieniowi wzbudzenia (w rzeczywistości prąd i_d^r ma kierunek przeciwny do zaznaczonego na rys. 6.60). Przebiegi krzywych z rys. 6.62 odpowiadają przebiegowi krzywej I z rys. 6.58. Przy pracy prądnicowej na zewnętrznej rezystancję R jest $u_{d0}^r = -R i_{d0}^r$, więc ze wzoru (6.165) otrzymuje się

$$\frac{-i_{d0}^r}{u_{d0}^r} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{af}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_f^s [R_q^r (R + R_d^r) + G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2]} \quad (6.168)$$

Wielkość $R_q^r (R + R_d^r)$ przy danych prądach odpowiada iloczynowi spadków napięcia na tych rezystancjach, a wielkość $G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2$ odpowiada iloczynowi napięć rotacji, więc $R_q^r (R + R_d^r) \ll G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2$, a zatem wzór (6.168) upraszcza się do postaci

$$\frac{-i_{d0}^r}{u_{d0}^r} \approx \frac{G_{af}^{rs}}{R_f^s G_{qd}^{rr}} \quad (6.169)$$

albo

$$\frac{-i_{d0}^r}{i_{d0}^s} \approx \frac{G_{af}^{rs}}{G_{qd}^{rr}} = K \quad (6.170)$$

Z przybliżonych wzorów (6.169) i (6.170) widać, że prąd w podłużnym obwodzie twornika (w linii) nie zależy od rezystancji odbiornika R i przy danej wartości prądu wzbudzenia ma wartość prawie stałą. Metadyna jest więc źródłem prądu albo wzmacniaczem prądu, którego współczynnik wzmocnienia K jest określony wzorem (6.170).

Napięcie na zaciskach metadyny

$$u_{d0}^r = \frac{G_{af}^{rs}}{G_{qd}^{rr}} i_{d0}^s R \quad (6.171)$$

czyli przy stałym prądzie wzbudzenia i_{d0}^s jest proporcjonalne do rezystancji odbiornika R .

Maszyna odpowiadająca modelowi z rys. 6.61 nazywa się metadyną nieskompensowaną, albo krótko metadyną.

Z równań (6.163) przy założeniu stałej prędkości kątowej $\omega^r = \omega_0^r$, co jest dopuszczalne przy pracy prądnicowej, otrzymuje się równania przyrostowe w zapisie operatorowym

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{df}^s(s) &= (R_f^s + L_f^s s) \Delta I_{df}^s(s) + M_{fd} s \Delta I_d^r(s) \\ \Delta U_d^r(s) &= M_{df} s \Delta I_{df}^s(s) + (R_d^r + L_d^r s) \Delta I_d^r(s) + G_{dq}^{rr} \omega_0^r \Delta I_q^r(s) \\ 0 &= -G_{af}^{rs} \omega_0^r \Delta I_{df}^s(s) - G_{qd}^{rr} \omega_0^r \Delta I_d^r(s) + (R_q^r + L_q^r s) \Delta I_q^r(s) \end{aligned} \right\} \quad (6.172)$$

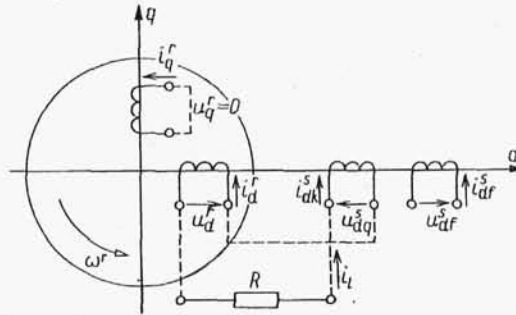
Ze względu na skomplikowaną postać tych równań badanie stanów dynamicznych metadyny przy ich użyciu jest utrudnione. Konieczną rzeczą staje się stosowanie odpowiednich uproszczeń, ale to z kolei powoduje rozbieżności między uzyskanymi odpowiedziami a przebiegami rzeczywistymi.

6.7.4. Amplidyna

6.7.4.1. Równania równowagi

Na rysunku 6.63 dany jest model metadyny skompensowanej, czyli amplidyny. Przepływ uzwojenia kompensacyjnego dk w stojanie jest skierowany przeciwko przepływowi uzwojenia podłużnego d w wirniku. Te dwa przepływy kompensują się. Dla takiego modelu równania równowagi mają postać

$$\begin{bmatrix} u_{df}^s \\ u_{dk}^s \\ u_d^r \\ u_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f^s + L_f^s s & -M_{fk}^s & M_{fd}^s & 0 \\ -M_{fk}^s & R_{dk}^s + L_{dk}^s s & -M_{dk}^s & 0 \\ M_{df}^s & -M_{kd}^s & R_d^r + L_d^r s & G_{dq}^{rr} \omega^r \\ -G_{qf}^{rs} \omega^r & +G_{qk}^{rs} \omega^r & -G_{qd}^{rr} \omega^r & R_q^r + L_q^r s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{df}^s \\ i_{dk}^s \\ i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} \quad (6.173)$$



Rys. 6.63. Model amplidyny

a równania więzów mają postać

$$\left. \begin{aligned} i_{dk}^s &= i_d^r = i_l \\ u_a &= u_{dk}^s + u_d^r \\ u_q^r &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.174)$$

6.7.4.2. Stan ustalony

Dla stanu ustalonego amplidyny otrzymuje się z równań (6.173) równania równowagi

$$\left. \begin{aligned} u_{df0}^s &= R_f^s i_{df0}^s \\ u_{dk0}^s &= R_{dk}^s i_{l0} \\ u_{d0}^r &= R_d^r i_{l0} + G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{q0}^r \\ 0 &= -G_{qf}^{rs} \omega_0^r i_{df0}^s + G_{qk}^{rs} \omega_0^r i_{l0} - G_{qd}^{rr} \omega_0^r i_{l0} + R_q^r i_{q0}^r \end{aligned} \right\} \quad (6.175)$$

skąd równania charakterystyki zewnętrznej

$$u_{a0} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{df0}^s + \frac{R_q^r (R_{dk}^s + R_d^r) + G_{dq}^{rr} (G_{qd}^{rr} - G_{qk}^{rs}) (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{l0} \quad (6.176)$$

Przy biegu jałowym ($i_{l0} = 0$) napięcie na zaciskach wyjściowych amplidyny równe napięciu indukowanemu w podłużnym obwodzie wirnika wynosi

$$u_{a0} = u_{ld0} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r} i_{df0}^s \quad (6.177)$$

i jest równe (co jest oczywiste) napięciu przy biegu jałowym metadyny określonego wzorem (6.167).

W stanie pracy prądnicowej amplidyny, podobnie jak w metadynie, dodatniemu prądowi sterującemu i_{df0}^s odpowiada dodatnie napięcie na podłużnym obwodzie wirnika (twornika) u_{d0}^r a zarazem dodatnie napięcie na zaciskach wyjściowych amplidyny u_{a0} oraz ujemny prąd i_{l0} .

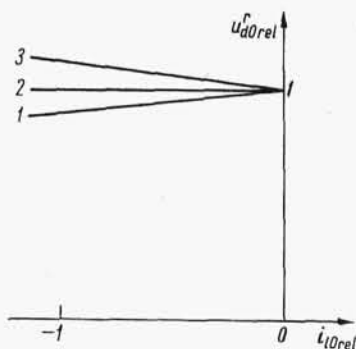
W amplidynie niedokompensowanej, to znaczy przy

$$G_{qk}^{rs} < \frac{R_q^r (R_{dk}^s + R_d^s) + G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2}{G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2} \quad (6.178)$$

albo w przybliżeniu przy

$$G_{qk}^{rs} < G_{qd}^{rr} \quad (6.179)$$

przy $i_{l0} < 0$ drugi człon wzoru (6.176) ma wartość ujemną i charakterystyka zewnętrzna amplidyny przebiega jak prosta 1 na rys. 6.64.



Rys. 6.64. Charakterystyki zewnętrzne amplidyny

W amplidynie idealnie skompensowanej, to znaczy przy

$$G_{qk}^{rs} = \frac{R_q^r (R_{dk}^s + R_d^s) + G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2}{G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2} \quad (6.180)$$

albo w przybliżeniu przy

$$G_{qk}^{rs} = G_{qd}^{rr} \quad (6.181)$$

drugi człon wzoru (6.176) ma wartość równą zero i charakterystyka zewnętrzna amplidyny przebiega jak prosta 2 na rys. 6.64.

W amplidynie przekompensowanej, to znaczy przy

$$G_{qk}^{rs} > \frac{R_q^r (R_{dk}^s + R_d^s) + G_{dq}^{rr} G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2}{G_{qd}^{rr} (\omega_0^r)^2} \quad (6.182)$$

albo w przybliżeniu przy

$$G_{qk}^{rs} > G_{qd}^{rr} \quad (6.183)$$

drugi człon wzoru (6.176) przy $i_{10} < 0$ ma wartość dodatnią i charakterystyka zewnętrzna amplitudyny przebiega jak prosta 3 na rys. 6.64. Przekompensowanie amplitudyny jest niedopuszczalne, ponieważ oznacza ono samorzutne dowzbudzenie się jej od prądu obciążenia, co może doprowadzić do zniszczenia maszyny. Charakterystyki zewnętrzne mają przebieg prostoliniowy przy założeniu stałych wartości indukcyjności. W rzeczywistości na skutek zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego charakterystyki zewnętrzne amplitudyny przebiegają odpowiednio jak krzywe 4, 2, 3 na rys. 6.58.

Skutek działania amplitudyny, tzn. wzmocnienie napięcia jak widać ze wzoru (6.177), a zwłaszcza wzmocnienie mocy, jest tym większe, im rezystancja R_q^r jest mniejsza. Dlatego uzwojenia poprzeczne wirników tych maszyn buduje się tak, aby ich rezystancja R_q^r , czyli gęstość prądu w tych uzwojeniach, była najmniejsza na jaką pozwalają warunki konstrukcyjne. Przyjęcie uproszczeń, jak we wzorach (6.179), (6.181) i (6.183) jest wobec tego całkowicie dopuszczalne.

Po podstawieniu $u_{a0} = -Ri_{10}$ do (6.176) otrzymuje się stosunek prądów

$$\frac{-i_{10}}{i_{df0}^s} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r R + R_q^r (R_{dk}^s + R_d^r) + G_{dq}^{rr} (G_{qd}^{rr} - G_{qk}^{rs}) (\omega_0^r)^2} \quad (6.184)$$

stosunek napięć

$$\frac{u_{a0}}{u_{df0}^s} = \frac{R}{R_f^s} \cdot \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_q^r R + R_q^r (R_{dk}^s + R_d^r) + G_{dq}^{rr} (G_{qd}^{rr} - G_{qk}^{rs}) (\omega_0^r)^2} \quad (6.185)$$

oraz stosunek mocy elektrycznej $p_{10} = u_{a0} i_{10}$ oddanej przez amplitudynę odbiornikowi do mocy elektrycznej $p_{f0} = u_{df0}^s i_{df0}^s$ doprowadzonej do uzwojenia sterującego amplitudyny

$$\frac{-p_{10}}{p_{f0}} = \frac{R}{R_f^s} \cdot \frac{[G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2]^2}{[R_q^r R + R_q^r (R_{dk}^s + R_d^r) + G_{dq}^{rr} (G_{qd}^{rr} - G_{qk}^{rs}) (\omega_0^r)^2]^2} \quad (6.186)$$

Dla amplitudyny idealnie skompensowanej, tzn. spełniającej warunek (6.180), otrzymuje się

$$\frac{-i_{10}}{i_{df0}^s} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R R_q^r} \quad (6.187)$$

$$\frac{u_{a0}}{u_{df0}^s} = \frac{G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2}{R_f^s R_q^r} \quad (6.188)$$

$$\frac{-p_{10}}{p_{f0}} = \frac{[G_{dq}^{rr} G_{qf}^{rs} (\omega_0^r)^2]^2}{R R_f^s (R_q^r)^2} \quad (6.189)$$

Współczynnikom (6.188) i (6.189) dla amplitudyny idealnie skompensowanej można nadać prostą interpretację fizyczną. Stosunek napięć określony wzorem (6.188) można przedstawić w postaci

$$\frac{u_{a0}}{u_{df0}^s} = \frac{-G_{af}^{rs} \omega_0^r i_{df0}^s}{R_f^s i_{df0}^s} \cdot \frac{G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{q0}^r}{-R_q^r i_{q0}^r} \quad (6.190)$$

i wprowadzić oznaczenia zgodnie z wzorami (6.175):

$$u_{iq0}^r = -G_{af}^{rs} \omega_0^r i_{df0}^s = -R_q^r i_{q0}^r \quad (6.191)$$

co oznacza napięcie indukowane w poprzecznym uzwojeniu wirnika przy biegu jałowym oraz

$$u_{ido}^r = +G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{q0}^r \quad (6.192)$$

co oznacza napięcie indukowane w podłużnym uzwojeniu wirnika przy biegu jałowym. Wtedy

$$\frac{u_{a0}}{u_{df0}^s} = K_1 K_2 \quad (6.193)$$

oraz

$$\frac{-p_{10}}{p_{f0}} = \frac{R_f^s}{R} (K_1 K_2)^2 \quad (6.194)$$

przy czym

$$K_1 = \frac{G_{af}^{rs} \omega_0^r}{R_f^s} = \frac{G_{af}^{rs} \omega_0^r i_{df0}^s}{R_f^s i_{df0}^s} = \frac{u_{iq0}^r}{u_{df0}^s} \quad (6.195)$$

$$K_2 = \frac{G_{dq}^{rr} \omega_0^r}{R_q^r} = \frac{G_{dq}^{rr} \omega_0^r i_{q0}^r}{R_q^r i_{q0}^r} = \frac{u_{ido}^r}{u_{iq0}^r} \quad (6.196)$$

Współczynnik K_1 jest odwrotnie proporcjonalny do R_f^s , więc wzmocnienie mocy jest odwrotnie proporcjonalne do R_f^s . Wzmocnienie mocy jest odwrotnie proporcjonalne także do $(R_q^r)^2$.

6.7.4.3. Stan dynamiczny

Z układu równań (6.173), równań więzów (6.174) oraz przyjęcia dla pracy prądnicowej $\omega_r = \omega_0$ otrzymuje się równania przyrostowe w zapisie operatorowym

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{df}^s(s) &= (R_f^s + L_f^s s) \Delta I_{df}^s(s) + (M_{fd} - M_{fk}) s \Delta I_f(s) \\ \Delta U_{dk}^s(s) &= -M_{fk} s \Delta I_{df}^s(s) + [R_{dk}^s + (L_{dk}^s - M_{dk}) s] \Delta I_k(s) \\ \Delta U_d^r(s) &= M_{df} s \Delta I_{df}^s(s) + [R_d^r + (L_d^r - M_{kd}) s] \Delta I_f(s) + G_{dq}^{rr} \omega_0^r \Delta I_q^r(s) \\ 0 &= -G_{af}^{rs} \omega_0^r \Delta I_{df}^s(s) + (G_{qk}^{rs} - G_{qd}^{rr}) \omega_0^r \Delta I_f(s) + (R_q^r + L_q^r s) \Delta I_q^r(s) \end{aligned} \right\} \quad (6.197)$$

W ogólnym przypadku transmitancje operatorowe uzyskane z tych równań mają postać bardzo skomplikowaną. Bardzo często wyznacza się transmitancję operatorową amplitudyny albo przy szczególnie prostych warunkach pracy albo przy

uproszczeniach możliwych do przyjęcia w szczególnych przypadkach konstrukcji amplidyny. Można na przykład analizować amplidynę skompensowaną, ale nie według warunku (6.180), czemu odpowiada prosta 2 na rys. 6.64, tylko skompensowaną tak, że strumień wywołany prądem i_l w uzwojeniu kompensacyjnym (dk) stojana jest równy (i przeciwnie skierowany) strumieniowi wznieconemu w uzwojeniu podłużnym wirnika. Wtedy charakterystyka $u_{a0} = f(i_{a0})$ jest lekko opadająca i przebiega nieco poniżej prostej 2 o wartości rzędnych $(R_d^r + R_{dk}^s) i_{a0}$. Można także w przybliżeniu pominąć strumienie rozproszone, czyli przyjąć, że cały strumień wzniecony w danym uzwojeniu jest skojarzony z odpowiednim drugim uzwojeniem. Wtedy

$$\left. \begin{aligned} L_d^r &= L_{dk}^s = M_{dk} = M_{kd} \\ M_{fd} &= M_{fk} \\ G_{qk}^{rs} &= G_{qd}^{rr} \end{aligned} \right\} \quad (6.198)$$

a z równań (6.197) otrzymuje się uproszczone równania przyrostowe

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{df}^s(s) &= (R_f^s + L_f^s s) \Delta I_{df}^s(s) \\ \Delta U_{dk}^s(s) &= -M_{fk} s \Delta I_{df}^s(s) + R_{dk}^s \Delta I_l(s) \\ \Delta U_d^r(s) &= M_{df} s \Delta I_{df}^s(s) + R_d^r \Delta I_l(s) + G_{dq}^{rr} \omega_0^r \Delta I_q^r(s) \\ 0 &= -G_{qf}^{rs} \omega_0^r \Delta I_{df}^s(s) + (R_q^r + L_q^r s) \Delta I_q^r(s) \end{aligned} \right\} \quad (6.199)$$

Traktując na przykład w amplidynie obciążonej generatorowo, odbiornikiem rezystancyjnym o rezystancji $R = -u_a/i_b$, przyrost napięcia wzbudzenia Δu_{df}^s jako wymuszenie, a przyrost napięcia $\Delta u_a = \Delta u_{dk}^s + \Delta u_d^r$ na zaciskach wyjściowych amplidyny jako odpowiedź, otrzyma się transmitancję operatorową

$$G(s) = \frac{\Delta U_a(s)}{\Delta U_{df}^s(s)} = \frac{R}{R + R_{dk}^s + R_d^s} K_1 K_2 \frac{1}{(1 + T_{df}^s s)(1 + T_q^r s)} \quad (6.200)$$

w której: $K_1 K_2$ – współczynnik wzmocnienia, którego czynniki określone są wzorami (6.195) i (6.196); T_{df}^s – stała czasowa podłużnego obwodu wzbudzenia stojana

$$T_{df}^s = \frac{L_f^s}{R_f^s} \quad (6.201)$$

T_q^r – stała czasowa poprzecznego (zwartego) obwodu wirnika

$$T_q^r = \frac{L_q^r}{R_q^r}$$

Ponieważ

$$\frac{R}{R + R_{dk}^s + R_d^s} \approx 1$$

wobec tego

$$G(s) = \frac{\Delta U_a(s)}{\Delta U_{df}(s)} \approx K_1 K_2 \frac{1}{(1 + T_{df}^s s)(1 + T_q^r s)} \quad (6.202)$$

Jest to transmitancja operatorowa członu inercyjnego drugiego rzędu.

Dla stanu biegu jałowego ($i_t = 0$) z układu równań (6.197) otrzymuje się

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{df}^s(s) &= (R_f^s + L_f^s s) \Delta I_{df}^s(s) \\ \Delta U_{dk}(s) &= -M_{fk}^s s \Delta I_{df}^s(s) \\ \Delta U_d^r(s) &= M_{df}^s s \Delta I_{df}^s(s) + G_{dq}^{rr} \omega_0^r \Delta I_q^r(s) \\ 0 &= -G_{qf}^{rs} \omega_0^r \Delta I_{df}^s(s) + (R_q^r + L_q^r s) \Delta I_q^r(s) \end{aligned} \right\} \quad (6.203)$$

skąd transmitancja operatorowa

$$G(s) = \frac{\Delta U_a(s)}{\Delta U_{df}(s)} = \frac{M_{df} - M_{fk}}{R_f^s} \cdot \frac{s}{1 + T_{df}^s s} + K_1 K_2 \cdot \frac{1}{(1 + T_{df}^s s)(1 + T_q^r s)} \quad (6.204)$$

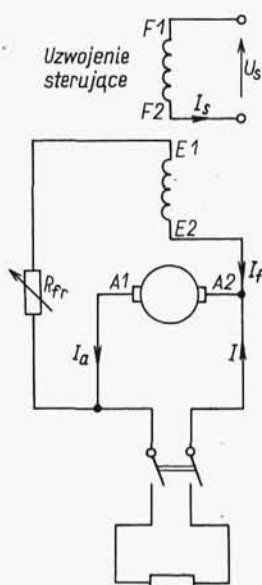
W amplitudynie skompensowanej według warunku (6.198) transmitancja operatorowa przy biegu jałowym

$$G(s) = \frac{\Delta U_a(s)}{\Delta U_{df}(s)} = K_1 K_2 \frac{1}{(1 + T_{df}^s s)(1 + T_q^r s)} \quad (6.205)$$

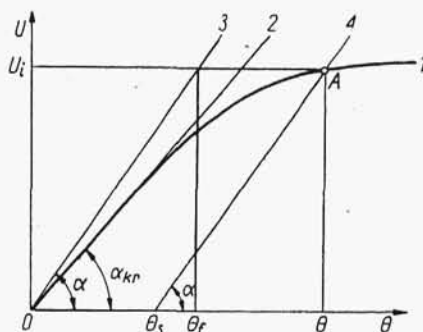
i jest równa określonej wzorem (6.202) transmitancji operatorowej tak skompensowanej amplitudyny przy obciążeniu.

6.8. ROTOTROL

Rototrol jest prądnicą prądu stałego np. bocznikową z dodatkowym uzwojeniem sterującym $F1-F2$ zasilanym z obcego źródła jak na rys. 6.65. Na rysunku 6.66 przedstawiono charakterystykę magnesowania wirnika rototrola (krzywa 1), tzn. zależność napięcia indukowanego w tworniku U_{if} od przepływu Θ uzwojeń w osi podłużnej. Prosta 2 styczna do charakterystyki magnesowania tworzy z osią odciętych kąt α_{kr} , którego tangens określa rezystancję krytyczną R_{fkr} w obwodzie bocznikowym wzbudzenia, tzn. maksymalną wartość rezystancji, przy której może jeszcze nastąpić samowzbudzenie się prądnicy bocznikowej. Prosta 3 oznacza prostą napięć na zaciskach uzwojenia wzbudzenia (a równocześnie na zaciskach twornika), czyli prostą zależności $U_f = R_f I_f$. Prosta 3 tworzy z osią odciętych kąt $\alpha > \alpha_{kr}$, wobec czego jest $\tan \alpha > \tan \alpha_{kr}$ oraz $R_f > R_{fkr}$. Oznacza to, że proces samowzbudzenia się nie może nastąpić. Jeśli jednak od prądu I_s w uzwojeniu sterującym powstanie przepływ Θ_s skierowany zgodnie z przepływem wzbudzenia Θ_f , to skutek jest taki, że prosta 3 jak gdyby przesuwana się do położenia prostej 4. Następuje wzbudzenie



Rys. 6.65. Schemat ideowy połączeń rototrola.



Rys 6.66. Charakterystyki rototrola

rototrola do punktu *A* pod wpływem przepływu wypadkowego Θ , będącego sumą przepływu sterującego Θ_s i przepływu wzbudzenia Θ_f . Współczynnik wzmocnienia rototrola może wynosić $k = 500 \div 1000$. Przez zastosowanie uzwojeń sprzężenia zwrotnego można dostosować rototrol do pracy w układach zautomatyzowanych. Zastosowanie rototrola w nowoczesnych układach jest niewielkie, ponieważ w tych układach obecnie stosuje się najczęściej wzmacniacze energoelektroniczne.

6.9. HAMOWANIE MASZYNAMI PRĄDU STAŁEGO

Prędkość obrotowa silnika zasilanego z sieci sztywnej prądu stałego o napięciu $U_s = \text{const}$ i z włączonym w obwód twornika opornikiem regulacyjnym o rezystancji R_{ar} może być wyrażona wzorem

$$n = \frac{U_s - (R_{at} + R_{ar}) I_a}{c_U \Phi} \quad (6.206)$$

Na podstawie wzoru (6.44) prędkość obrotowa może być wyrażona wzorem

$$n = \frac{U}{c_U \Phi} - \frac{(R_{at} + R_{ar}) M_e}{c_U c_M \Phi^2} \quad (6.207)$$

albo wzorem

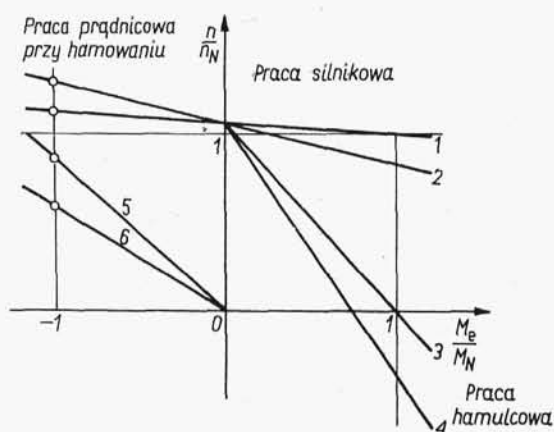
$$n = n_{0t} - c M_e \quad (6.208)$$

w którym

$$n_{0i} = \frac{U}{c_U} \quad (6.209)$$

$$c = \frac{R_{at} + R_{ar}}{c_M c_U \Phi^2}$$

W silniku obcowzbudnym przy nieregulowanym wzbudzeniu jest (w przybliżeniu) $\Phi = \text{const}$ i wielkości n_{0i} oraz c są stałymi. Na rysunku 6.67 dane są przebiegi $n_{\text{rel}} = f(M_{\text{rel}})$ dla różnych wartości R_{ar} : prosta 1 – $R_{ar} = 0$ (charakterystyka naturalna), prosta 2 – $R_{ar} = R_{ar1}$ (charakterystyka zmiękczona), prosta 3 – $R_{ar} = R_{ark}$ (dla której przy momencie elektromagnetycznym znamionowym prędkość obrotowa jest równa zero), prosta 4 – $R_{ar} > R_{ark}$ (dla której przy momencie elektromagnetycznym znamionowym jest prędkość obrotowa ujemna). Włączenie odpowiednio dużej rezystancji R_{ar} (większej od R_{ark}) powoduje przy danej wartości $M_e = \text{const}$ zmianę kierunku wirowania. Kierunek prądu I_a , momentu M_e oraz kierunek prze-



Rys. 6.67. Wykres ilustrujący hamowanie maszyną obcowzbudną prądu stałego

plywu mocy pozostają bez zmiany. Silnik wiruje w kierunku przeciwnym do kierunku M_e pod wpływem momentu zewnętrznego, który w tych warunkach ma charakter momentu napędowego, a nie hamującego. Silnik znajduje się w stanie pracy hamulcowej. Przejście od stanu pracy silnikowej do stanu pracy hamulcowej może nastąpić np. na skutek działania momentu od opadającego dźwigu współpracującego z silnikiem obcowzbudnym. Przy pracy silnikowej część mocy elektrycznej pobranej z sieci, odpowiadająca spadkowi napięcia $(R_{at} + R_{ar}) I_a$ na rezystancjach i zmniejszeniu prędkości obrotowej $(n_{0i} - n)$ wydzielą się na rezystancjach, a część mocy $U_i I_a = c_U \Phi n I_a = [U_s - (R_{at} + R_{ar}) I_a] I_a$ jest przetwarzana w moc mechaniczną. Przy prze-

ściu do pracy hamulcowej następuje zmiana kierunku prędkości obrotowej, zmiana kierunku przepływu mocy mechanicznej i zmiana kierunku napięcia indukowanego. Wtedy ze wzoru (6.206) otrzymuje się

$$I_a = \frac{U_s + c_U \Phi_n}{R_{at} + R_{ar}}$$

a moc tracona w rezystancjach wynosi

$$(R_{at} + R_{ar}) I_a^2 = U_s I_a + c_U \Phi_n I_a$$

Moc $U_s I_a$ oznacza moc elektryczną pobraną przez hamulec z sieci, a moc $c_U \Phi_n I_a = U_i I_a$ oznacza moc przetworzoną w hamulcu z mocy mechanicznej pod wpływem doprowadzonego momentu na moc elektryczną.

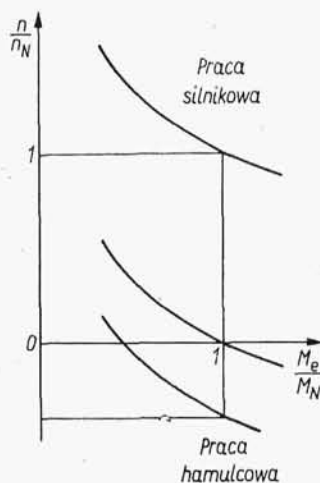
Przy zmniejszaniu momentu w silniku obcowzbudnym następuje prostoliniowy (w przybliżeniu) wzrost prędkości obrotowej. Przy $M_e = 0$ jest $n = n_{0i}$ oraz $I_a = 0$. Po zmianie kierunku (znaku) momentu obrotowego zewnętrznego, który staje się momentem napędowym, następuje dalszy wzrost prędkości obrotowej, wzór (6.208) przyjmuje postać

$$n = n_{0i} + c_1 |M_e|$$

maszyna przechodzi w stan pracy prądnicowej oddając do sieci przetworzoną z mocy mechanicznej na elektryczną moc $U_s I_a$. W tym zakresie hamowania, zwanym *hamowaniem prądnicowym*, następuje zwrot energii do sieci (odzysk energii), lecz hamowanie może zaistnieć tylko przy odpowiednio dużej prędkości obrotowej ($n > n_{0i}$). Przez zmianę rezystancji R_{ar} można otrzymać zmianę prędkości hamowania.

Pracę prądnicową można uzyskać także przez odłączenie twornika od sieci i zwarcie go przez odpowiednią rezystancję R_{ar} . W zależności od wartości R_{ar} otrzymuje się proste o różnym kącie nachylenia, przechodzące przez początek układu współrzędnych (proste 5 i 6 na rys. 6.67). Prędkości hamowania są w tym przypadku mniejsze. Moc mechaniczna przekazana maszynie elektrycznej przez urządzenie współpracujące z nią jest przetworzona na moc elektryczną i stracona w rezystancjach $R_{at} + R_{ar}$. Gdyby obwód magnetyczny był liniowy, można by ze stanu pracy silnikowej przejść do stanu pracy prądnicowej także przez zwiększenie prądu I_f ; przy nasyconym obwodzie magnetycznym jest to praktycznie niemożliwe.

W maszynie szeregowej włączenie w obwód twornika rezystancji R_{ar} powoduje obniżenie napięcia doprowadzonego do twornika. Powoduje to obniżenie charakterystyk mechanicznych, jak na rys. 6.68 podobnie jak dla maszyny bocznikowej. Przy wartości R_{ar} większej od R_{ark} (przy której dla $M_e = M_N$ jest $n = 0$) dla $M_e = M_N$ następuje równowaga momentów przy pewnej ujemnej prędkości obrotowej, czyli maszyna znajduje się w zakresie pracy hamulcowej. Z powodu prawie hiperbolicznego przebiegu charakterystyki $n = f(M)$ nie można w maszynie szeregowej przejść w zakres pracy prądnicowej przez zwiększenie prędkości obrotowej. Można natomiast wyłączyć uzwojenie wzbudzenia z obwodu twornika,



Rys. 6.68. Wykres ilustrujący hamowanie maszyną szeregową prądu stałego

dołączyć je przez dużą rezystancję do sieci, otrzymać w ten sposób maszynę obcowzbudną i wtedy przejść w zakres pracy prądnicowej przez zwiększenie prędkości obrotowej.

Pracy prądnicowej maszyny szeregowej odłączonej od sieci i zwartej przez rezystancję nie stosuje się, ponieważ przy dużej rezystancji maszyna nie wzbudza się, a przy rezystancji zmniejszonej maszyna wzbudza się bardzo gwałtownie i hamowanie ma charakter silnego wstrząsu.