

Mgr inż. Władysław Paszek

Zakład Maszyn Elektrycznych

Amplidynowe sterowanie nowoczesnego zespołu Leonarda

Streszczenie: Opis działania układu regulacyjnego. Obliczenie poszczególnych elementów układu regulacyjnego. Analiza stanu nieustalonego. Określenie czasu rozruchu i hamowania. Przykłady pomiarów oscylograficznych nowoczesnego zespołu Leonarda.

1. Opis układu

Użycie amplidyny w szerokim zakresie automatyki w przemyśle pozwala na znaczne uproszczenie układów w porównaniu do skomplikowanych elektrycznie i mechanicznie dawniej stosowanych układów regulacyjnych (układów przekaźnikowych lub innych regulatorów elektromechanicznych).

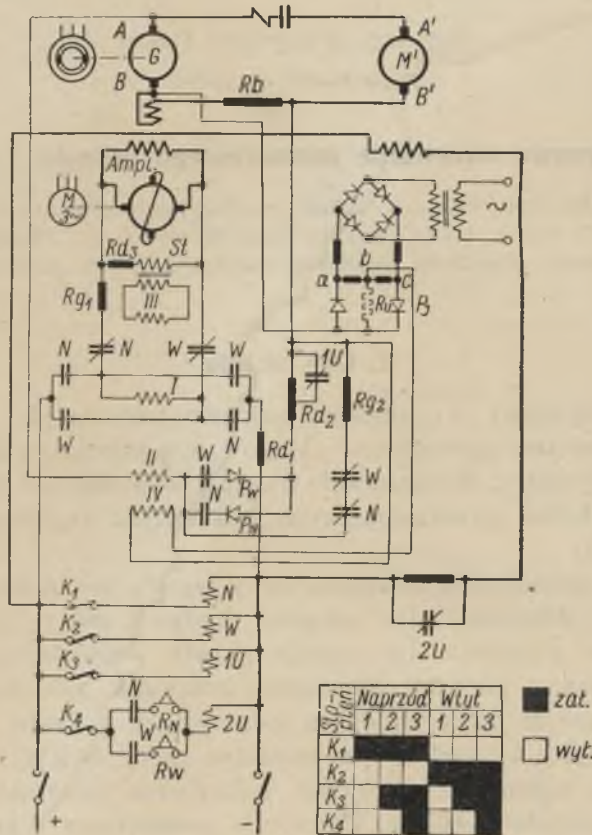
Rysunek 1 przedstawia schemat ideowy zespołu Leonarda ze wzbudnicą amplidynową, stosowany dla napędów średnich mocy (przeciętnie do 400 KW). Moc graniczna dla takiego układu podyktowana jest mocą amplidyn. Podana powyżej przeciętna graniczna moc napędu odnosi się do największych mocy amplidyn stosowanych w kraju rzędu 10 kW. Zagranicą spotyka się wykonania amplidyn mocy 50 kW i więcej.

Amplidyna zasilająca uzwojenie wzbudzenia generatora Leonarda posiada 4 uzwojenia sterujące. Uzwojenie podstawowe I przyłączone na pomocnicze napięcie stałe poprzez ruchowe kontakty sterujące N względnie W (zamknięcie kontaktów ruchowych N następuje dla kierunku „naprzód“ kontaktów ruchowych W — dla kierunku „w tył“ nawrotnego napędu Leonarda) i określa w czasie pracy biegunowość napięcia wyjściowego amplidyny i tym samym napięcia generatora.

Uzwojenie sterujące II jest uzwojeniem napięciowego sprzężenia zwrotnego i przyłączone jest do zacisków generatora poprzez oporność R_{d2} oraz prostowniki suche P_N i P_W .

Kierunek przepustowy prostownika włączonego przez kontakty W względnie N odpowiada przepływowi prądu sterującego w czasie rozruchu. SMM uzwojenia II skierowana jest zawsze przeciwko SMM uzwojenia podstawowego (ujemne sprzężenie zwrotne).

Uzwojenie sterujące *III* przedstawia uzwojenie stabilizujące amplidyny przyłączone do zacisków wtórnych transformatora stabilizacyjnego (S_T). Transformator o nastawialnej szczelinie przyłączony jest po stronie pierwotnej do zacisków wyjściowych amplidyny. Dzięki szczelinie obwód magnetyczny transformatora nie ulega nasyceniu od napięcia sta-



Rys. 1. Schemat ideowy zespołu Leonarda z prądnicą wzbudzaną za pomocą amplidyny

Oznaczenia: G, M — prądnica oraz silnik nawrotnego zespołu Leonarda; $Ampl$ — amplidyna; I, II, III, IV — uzwojenia sterujące amplidyny; W — styczniki oraz kontakty dla kierunku „na tył”; N — styczniki oraz kontakty dla kierunku „naprzód”; $R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}, R_{d4}$ — opory dodatkowe; R_u — opór upustowy; P_w, P_N, P_I — prostowniki suche; $1U, 2U$ — styczniki oraz kontakty wyższych stopni obrotów zespołu; K_1, K_2, K_3, K_4 — położenia drążka nastawnika; ---|--- przekreślony kontakt spoczynkowy; ---|/--- kontakt ruchowy; $\text{---}\triangle\text{---}$ kontakty przełącznika czasowego R_N i R_w (przełącznik niewidoczny na rysunku)

łego amplidyny (nasycenie obniża indukcyjność wzajemną transformatora). Po stronie wtórnej otrzymuje się w okresach nieustalonych napięcie proporcjonalne do pochodnej strumienia, a zatem w przybliżeniu do pochodnej napięcia amplidyny. (Wskutek znacznej oporności R_{d3} można praktycznie pominąć przesuw fazy między składowymi zmien-

nymi napięcia amplidyny i prądu uzwojenia pierwotnego transformatora w okresach nieustalonych). SMM uzwojenia *III* skierowana jest w kierunku zmniejszenia stromości zmian napięcia amplidyny. Tym samym uzwojenie to wpływa na powiększenie stateczności układu w stanie nieustalonym i zapobiega nadmiernemu przeregulowaniu układu. Przez dobór oporności R_{d3} oraz szczeliny transformatora należy zapewnić warunki przebiegów aperiodycznych w czasie stanów nieustalonych względnie co najmniej warunki zanikających kołysań.

Uzwojenie sterujące *IV* jest uzwojeniem prądowego sprzężenia zwrotnego zasilanym z układu porównującego spadek napięcia na boczniku w głównym obwodzie Leonarda ze stałym napięciem odniesienia, zwykle zbieranym z oddzielnego zespołu prostownika suchego i tym samym nie związanego z napięciem sterującym uzwojenia podstawowego.

Układ mostkowy prostowników suchych P_1 przepuszcza prąd do uzwojenia sterującego *IV* dopiero, gdy spadek napięcia na boczniku w głównym obwodzie Leonarda przekroczy napięcie porównawcze zbierane z odcinków *ab* względnie *bc* układu mostkowego.

Przy przepływie znacznego prądu w obwodzie głównym od *B* do *B'* (punkt *B* ma potencjał wyższy) prąd sterujący płynie od punktu *B* przez *a, b* do uzwojenia sterującego *IV* i powoduje przez zmianę napięcia amplidyny zmniejszenie prądu głównego obwodu Leonarda.

Tak np. przy rozruchu prądowe sprzężenie zwrotne po przekroczeniu wartości granicznej I_g określonej napięciem porównawczym obniża napięcie amplidyny a tym samym prąd wzbudzenia generatora i napięcia generatora. Gdy prąd w obwodzie głównym Leonarda płynie w kierunku przeciwnym od *B'* do *B* po przekroczeniu prądu granicznego I_g obwód sterujący zamyka się przez odcinek *b-c* porównawczego układu mostkowego i powoduje analogicznie jak poprzednio zmniejszenie prądu generatora.

2. Rozruch i regulacja obrotów silnika

W czasie rozruchu (załączenie kontaktów *N* względnie *W*) podstawowe uzwojenie sterujące *I* forsuje napięcie amplidyny powodując szybkie narastanie prądu wzbudzenia generatora mimo znacznej jego bezwładności magnetycznej. Ponieważ napięcie generatora w pierwszym okresie rozruchu jest znikome, ujemne napięciowe sprzężenie zwrotne nie wpływa na napięcie amplidyny. Dzięki dużej stromości napięcia generatora prąd obwodu głównego Leonarda narasta szybko powyżej wartości granicznej I_g , powodując przepływ prądu w prądowym uzwojeniu sterującym.

Przepływ ten zmniejsza wypadkową SEM amplidyny, a tym samym prąd obwodu głównego do wartości leżącej nieco powyżej wartości granicznej I_g .

W miarę narastania napięcia generatora i tym samym obrotów silnika zaczyna działać napięciowe uzwojenie sterujące *II* obniżające SEM amplitudyny i tym samym prąd silnika. Poniżej prądu granicznego napięcie porównawcze prostownikowego układu mostkowego blokuje prąd uzwojenia *IV* i napięcie ustala się na wartości odpowiadającej nastawieniu danego stopnia.

Punkt pracy ustalonej można wyznaczyć z charakterystyk statycznych E_a i generatora E_g , w funkcji amperozwojów wzbudzenia otrzymuje się

$$E_g = \frac{S_a S_g}{R_w} W \Theta_s.$$

Przy założeniu idealnego biegu jałowego silnika zespołu Leonarda amperozwoje sterujące amplitudyny składają się w stanie ustalonym z amperozwojów uzwojenia *I* i *II*:

$$\Theta_s = \Theta_1 - \Theta_2,$$

$$\Theta_2 = \frac{E_g}{R_2} W_2,$$

$$E_g = S_g I_w W,$$

$$I_w = \frac{E_a}{R_w},$$

stąd

$$E_g = \frac{\Theta_1 S_a \cdot S_g W}{R_w \left(1 + \frac{S_a S_g W \cdot W_2}{R_2} \right)}, \quad (1)$$

gdzie

S_a oraz S_g — nachylenie charakterystyki wewnętrznej amplitudyny oraz generatora w funkcji amperozwojów,

Θ_1, Θ_2 oraz Θ_s — amperozwoje uzwojenia *I, II* oraz wypadkowe,

R_w — oporność W zwojnego uzwojenia wzbudzenia generatora łącznie z oporem wewnętrznym amplitudyny.

Wpływ zakrzywienia charakterystyk (nasyceń) na ustalone punkty pracy najwłaściwiej przedstawić wykreślnie. Na rysunku 2 krzywa *a* przedstawia zależność $E_g = f(\Theta_s)$ będącą wypadkową charakterystyki amplitudyny i generatora, krzywa *b* przedstawia charakterystykę amperozwojów sterującego uzwojenia *II* w funkcji napięcia generatora (zakrzywienie spowodowane wpływem oporności prostownika).

Przecięcie przesuniętej o wartość Θ_1 charakterystyki *b* z krzywą *a* określa ustalony punkt pracy.

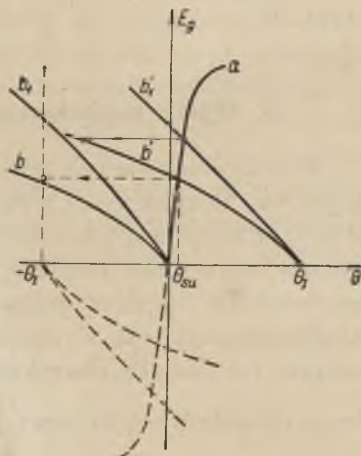
Wykres wyznacza jednocześnie współczynnik forsowania k_f amplitudyny w czasie nie ustalonym przy prądach głównego obwodu mniejszych od

wartości granicznej (na początku rozruchu),

$$k_f = \frac{\Theta_1}{\Theta_{su}},$$

gdzie Θ_{su} oznacza wypadkowe amperozwoje amplidyny odpowiadające ustalonemu napięciu generatora.

Ze względu na znikome stałe czasowe uzwojeń amplidyny w porównaniu do stałej czasowej uzwojenia wzbudzenia generatora można praktycz-



Rys. 2. Wyznaczenie ustalonych punktów pracy prądnicy zespołu Leonarda za pomocą wypadkowej charakterystyki prądnicy i amplidyny a oraz charakterystyki ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego b dla układu przedstawionego na rys. 1

nie przyjąć ustalony stan amplidyny przed osiągnięciem prądu granicznego w głównym obwodzie.

W podanym na rysunku 1 przykładzie przewidziano jedynie 3 stopnie szybkości silnika, przy czym przejście na 2 stopień szybkości odbywa się tu przez zmianę oporu w obwodzie uzwojenia sterującego II .

Kontakt spoczynkowy stycznika IU wtrąca większy opór w obwód napięciowego uzwojenia sterującego, powodując zmniejszony wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego i tym samym wyższe napięcie ustalone (we wzorze (1) zwiększa się dla tego położenia nastawnika wartość oporności R_2). Na rysunku 2 charakterystyka amperozwojów sterujących b_1 podniesie się i wyprostuje wskutek zwiększonego udziału liniowego oporu czynnego w całkowitej oporności R_2 .

Trzeci stopień szybkości otrzymuje się przez osłabienie pola silnika. Przekładniki czasowe RW i RN zwalniające stycznik osłabienia pola uniemożliwiają jednoczesne forsowanie napięcia generatora i osłabienie pola, co prowadziłoby do zbyt dużych przetężeń. (Uzwojenie prądowego sprzężenia zwrotnego musiałoby być znacznie silniejsze, by podoląć tej nadwyżce prądowej). Osłabienie pola następuje z opóźnieniem po osiągnięciu obrotów znamionowych.

Trójstopniowa regulacja obrotów zespołu Leonarda zastosowana w omówionym przypadku może być w innych przypadkach zastąpiona regulacją ciągłą, np. przez zmianę napięcia sterującego uzwojenia podstawowego. Takie rozwiązanie regulacji przez zmianę napięcia uzwojenia I nie jest jednakże korzystne ze względu na zmieniający się współczynnik forsowania przy rozruchu dla każdego nastawienia, wskutek czego układ dla każdego z nastawień dochodziłby do obrotów ustalonych w niejednolity sposób. Konieczność ograniczenia prądu rozruchu daje w takim układzie pełne wykorzystanie układu w czasie rozruchu tylko dla maksymalnych obrotów.

3. Wpływ napięciowego sprzężenia zwrotnego na pracę układu

W dotychczasowych rozważaniach przyjmowano pracę silnika na biegu jałowym. Rozpatrzmy obecnie wpływ obciążenia zespołu na charakterystykę zewnętrzną silnika obrotów od momentu obciążenia $n = f(M)$. Sztywne ujemne sprzężenie zwrotne, powodujące w miarę narastania generatora zmniejszenie współczynnika forsowania, wpływa zasadniczo na statykę ustalonego napięcia wyjściowego generatora w funkcji obciążenia i tym samym na statykę charakterystyki zewnętrznej silnika $n = f(M)$. Pochylenie charakterystyki zewnętrznej określa kąt β ($\operatorname{tg} \beta = \frac{dn}{dM}$).

Wprowadzając do równania (1) napięcie wewnętrzne silnika $E_s = E_g - IR$ oraz napięcie zasilania uzwojenia sterującego $II: U = E_s + IR_s$ otrzymuje się po przekształceniach

$$E_s = C_s n = \frac{\theta_1 S}{1 + S \frac{W_2}{R_2}} - I \left(R_s + \frac{R_g}{1 + \frac{S W_2}{R_2}} \right),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{dn}{dM} = \frac{1}{C_s C_M} \left(R_s + \frac{R_g}{1 + \frac{S W_2}{R_2}} \right) \approx \frac{1}{C_s C_M} R_s, \quad (2)$$

gdzie

$$S = \frac{S_a S_g}{R_s} W,$$

I — prąd w obwodzie głównym zespołu Leonarda,

R — opór sumaryczny głównego obwodu zespołu Leonarda,

R_s — opór wewnętrzny silnika,

R_g — opór wewnętrzny generatora łącznie z opornością bocznika,

R — $R_s + R_g$.

Przy założonym stałym wzbudzeniu, a zatem przy pominięciu wpływu reakcji twornika przy stałym strumieniu silnika głównego napędu moment rozwijany przez silnik jest proporcjonalny do prądu twornika $M = C_M I$.

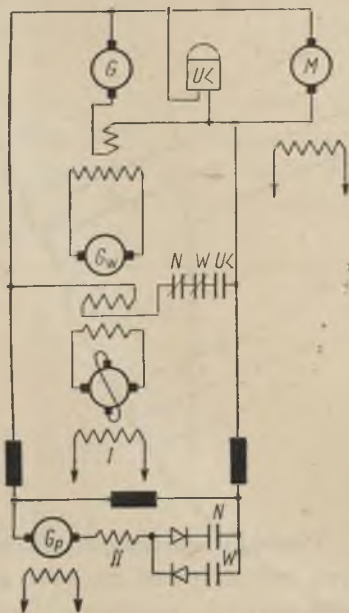
Siła elektromotoryczna silnika przy powyższych założeniach jest proporcjonalna do obrotów silnika $E_s = C_s n$.

Ujemne sprzężenie zwrotne powoduje zmniejszenie nachylenia charakterystyki zewnętrznej silnika do wielkości odpowiadającej (przy silnym napięciowym sprzężeniu zwrotnym) praktycznie sztywnemu napięciu zasilania silnika.

Przy rozruchu wpływ ujemnego sprzężenia zwrotnego jest niekorzystny ze względu na zmniejszenie wypadkowych amperozwojów sterujących w miarę narastania napięcia. Tym samym otrzymuje się niekorzystny, malejący w czasie, przebieg napięcia wzbudzenia generatora, zwiększający tym samym łączny czas rozruchu układu. (Dla uzyskania stałego przyspieszenia silnika w czasie rozruchu napięcie wzbudzenia generatora powinno rosnać liniowo). Dla utrzymywania stałości wzmożonej SEM amplidyne w czasie całego okresu rozruchu, co stanowi znaczne polepszenie charakterystyki, wprowadza się często (w szczególności dla napędów dużych mocy) w obwód uzwojenia II dodatkową SEM porównawczą (rys. 3).

Umożliwia to poza tym prosty sposób regulacji obrotów przez zmianę wielkości SEM porównawczej oraz zapewnia stałość forsującego działania podstawowego uzwojenia sterującego I w czasie rozruchu dzięki prostownikom blokującym przepływ prądu w uzwojeniu II przy napięciach generatora niższych od SEM porównawczej. (Regulowanego napięcia porównawczego dostarcza zwykle mała prądniczka pomocnicza G_p).

Na rysunku 4 przedstawiono dla tego układu charakterystyki statyczne analogicznie jak rysunku 2 dla układu na rysunku 1. Przez zmianę napięcia porównawczego otrzymuje się równoległe przesunięcie charakterystyk b' określających w punktach A napięcie ustalone generatora. Dla wszystkich zakresów obrotów otrzymuje się przy rozruchu jednakowe stałe forsujące amperozwoje sterujące Θ_1 .

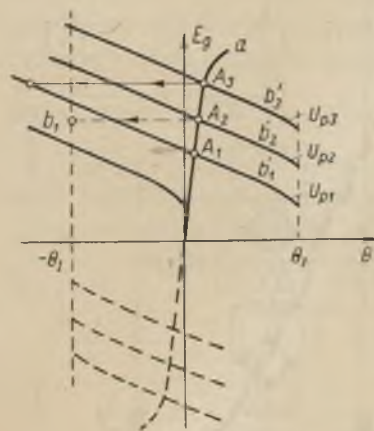


Rys. 3. Schemat ideowy nawrotnego zespołu Leonarda z wzbudnicą zasilaną z amplidyne

Oznaczenia: G, M, G — prądnica, silnik i wzbudnica prądnicy zespołu Leonarda; G_p — prądniczka pomocnicza; U — przełącznik podnapięciowy; N, W — kontakty dla kierunku „w tył” i „naprzód”

Przy przełączeniu układu na niższą wartość obrotów układ ten nie utrzymuje jednak stałości SMM amplidyny. Przy obniżeniu napięcia porównawczego dzięki znikomej czasowej prądniczki pomocniczej Gp zmiana napięcia odbywa się praktycznie bezzwłocznie po zmianie nastawienia napięcia na jej wzbudzeniu; nie zmienione w chwili przełączenia napięcie prądnicy jest wyższe od nastawionego napięcia porównawczego prądnicy pomocniczej i powoduje znaczne wzmocnienie SEM uzwojenia napięciowego sprzężenia zwrotnego (prąd w obwodzie uzwojenia II płynie w kierunku przepuszczania prostowników N względnie W), tak że w niektórych wypadkach sterujące amperozwoje wypadkowe mogą przekroczyć maksymalną wartość przy rozruchu.

Na rysunku 4 zaznaczono linią ciągłą przejście z punktu A_3 na charakterystykę odpowiadającą niższemu obrotom zespołu. Jak wynika z rysunku, amperozwoje mogą przekroczyć maksymalną wartość przy rozruchu θ_1 . Dla tej najwyższej wartości SMN należy dobrać wielkość prądowego sprzężenia zwrotnego, by prąd w obwodzie głównym nie przekroczył dopuszczalnej wartości.



Rys. 4. Wyznaczenie ustalonych punktów pracy prądnicy zespołu Leonarda za pomocą wypadkowej charakterystyki prądnicy, wzbudnicy i amplidyny a oraz charakterystyki ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego b dla układu przedstawionego na rys. 3

Prądowe sprzężenie zwrotne może w niektórych układach regulacyjnych oddziaływać na pole główne silnika (wzmocnienie strumienia przy przetężeniach powoduje obniżkę prądu w obwodzie głównym) w przypadku sterowanego układu wzbudzenia silnika, co spotyka się przy napędach dużych mocy, np. silnika głównego napędu zgniatacza.

Przy przetężeniach otrzymuje się przy tym korzystne zwiększenie momentu od powiększonego strumienia. W przypadku znacznych mocy układu Leonarda zachodzi często konieczność zrezygnowania z wtrącenia dodatkowej oporności (bocznika zasilającego uzwojenie prądowego sprzę-

żenia zwrotnego) w obwód główny silnika ze względu na trudność wykonania opornika (znaczące moce) oraz obniżenie sprawności zespołu. Przy zastosowaniu zwiększonego wypadowego wzmocnienia układu amplidyne-generator przez przyjęcie dodatkowej wzbudnicy pomocniczej generatora zasilającej amplidyne wystarcza spadek napięcia zbierany z uzwojenia kompensacji i biegunów zwrotnych maszyn głównego napędu do wystereowania uzwojenia prądowego sprzężenia zwrotnego amplidyne. (Wskutek włączenia dodatkowej maszyny powiększa się jednak wypadkową stałą czasową układu wymagającą przyjęcia zwiększonego stopnia forsowania, co częściowo kompensuje korzyści z otrzymanego zwiększenia wzmocnienia).

4. Wpływ prądowego sprzężenia zwrotnego

W czasie rozruchu silne prądowe sprzężenie zwrotne powoduje obniżenie maksymalnych przetężeń do wartości dopuszczalnych. W stanie ustalonym przy zwiększeniu obciążenia ponad wartość graniczną (określoną napięciem U_{a-b} względnie U_{b-c} układu porównawczego) uzwojenie *IV* powoduje załamanie napięcia generatora i tym samym charakterystyki zewnętrznej silnika (rys. 5a i 5b).

W granicy przy spadku obrotów do zera utrzymuje się prąd zwarcia I_k . W stanie tym amperozwoje uzwojenia *IV* znoszą praktycznie całe amperozwoje podstawowego uzwojenia prądowego. (Wypadkowa SMM odpowiada napięciu generatora równemu spadkom napięć w obwodzie głównym). Dla załamanej części charakterystyki zewnętrznej otrzymuje się:

$$E_s + IR = S \left(\Theta_1 - \frac{E_s + IR_s}{R_2} W_2 - \frac{I - I_g}{R_4} R_b W_4 \right), \quad (3)$$

stąd dla $E_s = 0$ (zatrzymanie silnika)

$$I_{n=0} = I_k = \frac{\left(\Theta_1 + I_g R_b \frac{W_4}{R_4} \right) S}{R + \left(\frac{R_b' W_4}{R_4} + R_s \frac{W_2}{R_2} \right) S}, \quad (4)$$

gdzie R_b – oporność bocznika.

Ponieważ opór bocznika zwykle jest znacznie większy od oporności wewnętrznej silnika R_s , wzór (4) przyjmie postać przybliżoną

$$I_k \approx I_g + \frac{\Theta_1 R_4}{W_4 R_b}. \quad (5)$$

Prąd sterujący dla prądu zwarcia:

$$I_{zk} = \frac{\Theta_1}{W_4} = (I_k - I_g) \frac{R_b}{R_4}. \quad (6)$$

Moc tracona na boczniku:

$$\Delta P_k = I_k^2 R = \frac{I_k^2 \Theta_1 R_4}{W_4 (I_k - I_g)}. \quad (7)$$

Ze wzoru (3) otrzymuje się nachylenie charakterystyki zewnętrznej

$$\frac{dn}{dM} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{C_s C_M} \frac{dE_s}{dI} = \frac{S \left(R_s \frac{W_2}{R_2} + R_b \frac{W_4}{R_4} \right) + R}{C_s C_M \left(1 + S \frac{W_2}{R_2} \right)}, \quad (8)$$

gdzie R – opór sumaryczny głównego obwodu zespołu Leonarda.

Dla otrzymania ostrego odcięcia charakterystyki zewnętrznej należy dążyć do większego zdymensjonowania prądowego uzwojenia sterującego oraz zmniejszenia udziału oporów zewnętrznych w całkowitej oporności R_4 .

Dużą stromość odcięcia otrzymuje się przez zwiększenie spadku napięcia na boczniku R_b , co odbywa się jednakże kosztem zmniejszenia sprawności. Dla zmniejszenia wtrąconej oporności bocznika zbiera się spadek napięcia również z uzwojenia biegunów zwrotnych i kompensacji maszyn głównego napędu. (W tym wypadku należy za wartość R_b wstawić oporność R'_b będącą sumą oporności uzwojeń biegunów zwrotnych i kompensacji oraz oporności dodatkowego bocznika R_b).

W celu zwiększenia wzmocnienia uzwojenia prądowego IV łączy się często 2 uzwojenia sterujące równolegle (o ile istnieją zapasowe uzwojenia sterujące amplitudyny).

Na rysunku 5a przedstawiono linią ciągłą idealną charakterystykę zewnętrzną silnika Leonarda w funkcji momentu obciążenia. Silnik utrzymuje idealną stałość obrotów w zakresie zmienności momentu do momentu granicznego. Po osiągnięciu momentu granicznego silnik zwalnia utrzymując stały moment M_g .

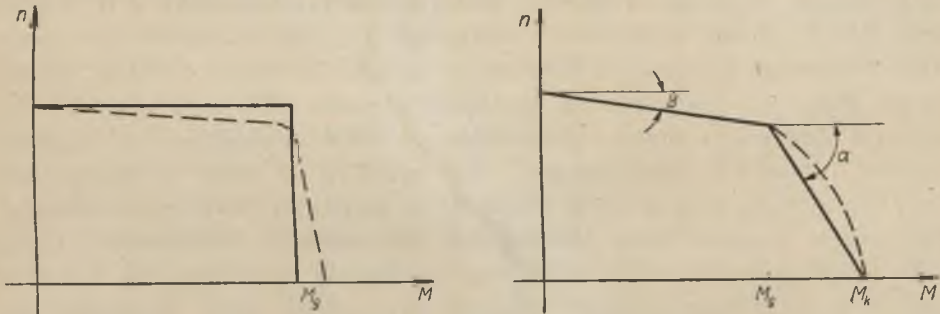
Praktyczny przebieg momentu zaznaczony linią kreskowaną odbiega od idealnego:

a) w zakresie momentu mniejszego od granicznego, w głównej mierze wskutek istnienia oporów czynnych twornika silnika (por. punkt 3),

b) w zakresie momentów większych od granicznego wskutek ograniczonej mocy prądowego sprzężenia zwrotnego,

e) w obszarze momentu granicznego zaokrąglenie załamania charakterystyki zewnętrznej spowodowane jest wpływem nieliniowych oporności prostowników suchych przy małych prądach w kierunku przepuszczania.

Układ sterowania z rysunku 1 pozwala łatwo zrealizować opadającą charakterystykę przedstawioną linią ciągłą na rysunku 5b, typową dla napędów pomocniczych zgniataczy względnie walcerek mogących pracować na opór (samotoki, napęd nożyce)¹.



Rys. 5a, b. Charakterystyki zewnętrzne silnika zespołu Leonarda (kąty α , β określają nachylenie charakterystyk)

W tym celu wtrąca się w układ porównawczy dodatkowy opornik upustowy R_u narysowany na schemacie rysunku 1 linią przerywaną, który powoduje początkowe ujemne prądowe sprzężenie zwrotne przed osiągnięciem prądu I_g .

Przebieg charakterystyki zewnętrznej określa wówczas równanie (8), przy czym ze względu na nieczynny układ porównawczy należy przyjąć $I_g = 0$ oraz wstawić zwiększoną wartość oporności obwodu sterowania R'_4 :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{S \left(R_s \frac{W_2}{R_2} + R'_b \frac{W_4}{R_4} \right) + R}{C_s C_M \left(1 + S \frac{W_2}{R_2} \right)} \quad (9)$$

Równanie (10) określa wartość oporności upustowej przy założonym stosunku $\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$. Na rysunku 5b zaznaczono kąty $\operatorname{tg} \alpha$ i β określające nachylenie charakterystyki zewnętrznej.

Ponieważ przy prądzie większym od granicznego na opór wypadkowy R_4 składa się również część oporu potencjometru mostkowego układu porównawczego, zachodzi konieczność dobrania małych oporów, a stąd większych mocy zasilania układu porównawczego.

¹ W literaturze radzieckiej charakterystyka taka nosi nazwę ekskawatorowej charakterystyki.

Przy małych oporach R_4 nieliniowy opór wewnętrzny prostownika powoduje zaznaczone na rysunku 5b odkształcenie charakterystyki zewnętrznej.

5. Rewersowanie

Przy przełączeniu układu na zmieniony kierunek obrotów prąd podstawowego uzwojenia sterującego zmienia znak i ustala się praktycznie natychmiast. Wskutek wtrącenia blokujących prostowników PW względnie PN w obwód uzwojenia sterującego II prąd napięciowego sprzężenia zwrotnego pojawia się dopiero po zmianie kierunku obrotów, dzięki czemu unika się nadmiernych przetężeń obwodu głównego przy zrewersowaniu obrotów (z powodu dodawania się SMM uzwojenia II do amperozwojów uzwojenia niezależnego). Na rysunku 2 oraz 4 zaznaczono linią przerywaną zmianę SMM ampidyny w pierwszej chwili rewersowania. Bez użycia prostowników blokujących zachodziłaby konieczność znacznego przedymensjonowania prądowego sprzężenia zwrotnego, np. kosztem obniżenia sprawności zespołu wskutek zwiększenia oporu bocznika, zaprojektowanego, jak wyjaśniono w punkcie 3 i 4, na amperozwoje θ_1 , względnie amperozwoje występujące przy zmianie obrotów.

Układ obniża obroty przy praktycznie stałym momencie (dzięki działaniu prądowego uzwojenia sterującego), a po zmianie kierunku dochodzi do obrotów ustalonych analogicznie jak przy rozruchu.

6. Hamowanie

Zatrzymanie układu dokonane przez wyłączenie styczników N i W (zerowe nastawienie wyłącznika K) połączone jest z hamowaniem prądnicowym (z rekuperacją energii) silnika zespołu Leonarda.

Uzwojenie sterujące II zostaje przy ominięciu prostowników przyłączone przez kontakty spoczynkowe W i N na zaciski silnika i wytwarza SMM rewersującą napięcie ampidyny, co powoduje szybkie zmniejszenie napięcia generatora. Jednocześnie podstawowe uzwojenie sterujące I przełączone jest w układzie samogaszącym na zaciski ampidyny, kompensując tym samym częściowo znaczną SMM uzwojenia II .

Uzwojenie I ogranicza w ten sposób nadmierne zwwyżki prądu silnika w czasie hamowania.

Po zaniku napięcia generatora uzwojenie sterujące powoduje odwzbudzenie ampidyny zmniejszając napięcie rewanentu wzmacniacza, które jak stwierdzono pomiarowo, dochodzi do 15% napięcia znamionowego ampidyny (bez układu samogaszenia) i może spowodować prądy obwodu głównego utrudniające zatrzymanie zespołu przy zerowym położeniu nastawnika.

Dla silnego obniżenia napięcia remanentu konieczne jest dobranie małej oporności gaszącej R_{g1} . Z drugiej strony mała oporność gasząca R_{g1} powoduje silne tłumienie napięcia amplidyń w czasie hamowania (wskutek demagnesyjnego działania amperozwojów uzwojenia II), co przyczynia się do zmniejszenia intensywności hamowania.

Prócz remanentu amplidyń na stan ustalony obrotów silnika wpływa również remanent obwodu magnetycznego generatora, który należy zmniejszyć przez dobór mniejszej wartości R_{g2} .

W przypadku napędów wielkiej mocy, np. napędów zgniataczy, stosuje się dodatkowe uzwojenie wzbudnicy pomocniczej (rys. 3) przyłączone w układzie samogaszącym na zaciski generatora głównego napędu po osiągnięciu minimalnego napięcia generatora (sterowanie takiego przełączenia odbywa się za pomocą przekaźnika podnapięciowego generatora).

Układ taki prócz silniejszego zdławienia remanentu powoduje ponadto lepsze wyrównanie intensywności hamowania w czasie. Poprzednio opisany układ hamowania cechuje niekorzystne, szybkie obniżanie intensywności hamowania w miarę obniżki obrotów silnika, spowodowane zmniejszeniem SMM amplidyń i tym samym zmniejszeniem szybkości obniżania napięcia generatora.

Dla większego wyrównania intensywności hamowania można zastosować w przypadku napędów znacznych mocy zmianę kierunku napięcia amplidyń analogicznie jak to ma miejsce przy rewersowaniu obrotów. Przy obniżeniu napięcia generatora do nastawionej wartości przekaźnik podnapięciowy przełącza generator i amplidyńę na wyżej opisany samogaszący układ hamowania.

7. Obliczenie elementów układu

Wyprowadzone zależności układu regulacyjnego zespołu Leonarda są podstawą do zaprojektowania poszczególnych elementów układu. Wychodząc z założonego współczynnika forsowania k_{fg} uzwojenia wzbudzenia prądniczy zespołu Leonarda oblicza się przy znanych danych prądniczy i silnika zespołu Leonarda odnośne oporności obwodów sterowania.

Współczynnik forsowania k_{fg} zależy od współczynnika forsowania uzwojenia sterującego amplidyń k_f , który obierany jest przeciętnie w granicach $3 \div 8$, przy czym wartości większe odnoszą się do napędów większych mocy o znacznej stałej czasowej uzwojenia wzbudzenia. Obrany współczynnik forsowania winien w zasadzie zapewnić osiągnięcie prądu granicznego w czasie rozruchu¹ i należy jego wielkość spraw-

¹ Często spotyka się zespoły Leonarda (szczególnie zespoły znacznych mocy), przy których w czasie rozruchu nie osiąga się prądu granicznego. Prądowy układ porównawczy służy wtedy zasadniczo jedynie do ograniczenia prądu w czasie normalnej pracy silnika oraz w czasie rewersowania.

dzić wzorem przybliżonym:

$$\frac{I_{\max}}{I_N} \approx \frac{k_{fs} E_{g \text{ nast}}}{R I_N} \frac{T_e}{T_w - T_e} \cdot \left(\frac{T_e}{T_w} \right)^{\frac{T_e}{T_w - T_e}} > I_g. \quad (10)$$

Wzór ten otrzymuje się z analizy rozruchu układu Leonarda po przyłożeniu stałego napięcia wzbudzenia U_w powodującego wykładniczy wzrost napięcia wewnętrznego generatora $E_g = E_{gu}(1 - e^{-\frac{t}{T_w}})$.

W rozważaniach pomija się wpływ reakcji twornika na SEM generatora. Po wprowadzeniu podstawowych równań dla elektrodynamicznego stanu nieustalonego przy pominięciu indukcyjności obwodu głównego¹

$$I(p) = \frac{E_g(p) - E_s(p)}{R} = \frac{E_{gu}(p) - C_s n(p)}{R},$$

$$p \frac{GD^2}{375} n(p) = C_M I(p).$$

otrzymuje się:

$$I(p) = \frac{E_{gu}(p)}{R} \frac{p}{p + \frac{1}{T_e}} = \frac{E_{gu}}{R} \frac{p T_e}{(p T_w + 1)(p T_e + 1)},$$

gdzie

$$T_e = \frac{GD^2}{375 C_s C_M} = T_r \frac{I_N R}{E_N}.$$

Stąd

$$I(t) = \frac{E_{gu}}{R} T_e \frac{e^{-\frac{t}{T_w}} - e^{-\frac{t}{T_e}}}{T_w - T_e},$$

$$I_{\max} = \frac{E_{gu}}{R} \frac{T_e}{T_w - T_e} \left[\left(\frac{T_e}{T_w} \right)^{\frac{T_e}{T_w - T_e}} - \left(\frac{T_e}{T_w} \right)^{\frac{T_w}{T_w - T_e}} \right] \approx \frac{E_{gu}}{R} \frac{T_e}{T_w - T_e} \left(\frac{T_e}{T_w} \right)^{\frac{T_e}{T_w - T_e}}, \quad (10a)$$

gdzie T_w – stała czasowa uzwojenia wzbudzenia $T_w = L_w / R_w$ ².

T_r – rozruchowa stała czasowa odpowiadająca czasowi do osiągnięcia obrotów ustalonych w czasie rozruchu pod wpływem momentu znamionowego silnika idącego na przyspieszenie mas,

¹ Przy użyciu rachunku operatorowego w niniejszym artykule stosuje się transformację Laplace'a-Carsona.

² W niniejszym artykule przyjmuje się T_w jako wartość stałą niezależną od nasycenia. W rzeczywistości stała ta maleje przy wyższych napięciach generatora wskutek zmniejszenia indukcyjności obwodu wzbudzenia L_w pod wpływem nasycenia.

T_e — elektromechaniczna stała czasowa,

I_N, E_N — parametry znamionowe silnika.

Dla napędów dużych mocy będących zasadniczo przedmiotem niniejszego opracowania, dla których elektromechaniczna stała czasowa rzędu 0,1 ÷ 0,5 sek jest znacznie mniejsza od stałej uzwojenia wzbudzenia generatora rzędu 2 ÷ 5 sek, maksymalną wartość prądu można obliczyć z przybliżonego równania (10) kładąc w równaniu (10 a) $E_{gu} = k_{fg} E_{g \text{ nast}}$.

Stąd minimalne napięcie wzbudzenia zapewniające osiągnięcieżądanego prądu rozruchu silnika głównego napędu kI_N :

$$U_{w \text{ min}} \approx k I_N R \frac{T_w - T_e}{T_e} \frac{R_w}{S_g W} \left(\frac{T_w}{T_e} \right)^{\frac{T_e}{T_w}}$$

$E_{g \text{ nast}}$ — napięcie generatora ustalające się w czasie rozruchu, które odpowiada położeniu drążka nastawnika.

Praktycznie przyjmuje się napięcie wzbudzenia odpowiadające napięciu amplidyne w układzie na rysunku 1 znacznie większe, zapewniające stromy wzrost prądu generatora do wartości kI_N , po osiągnięciu którego opisany wyżej układ prądowego sprzężenia zwrotnego ogranicza prąd rozruchu.

Współczynnik k określający dopuszczalną krotność prądu rozruchu (w odniesieniu do prądu znamionowego) wynosi około 1,5...1,8 i ograniczony jest zwykle komutacją maszyn względnie dopuszczalnym przyśpieszeniem, rzadziej nagraniem.

Jeżeli w czasie forsowania amplidyne pracuje jeszcze, na liniowej części charakterystyki magnesowania otrzymamy $k_{fg} = k_f$.

Przy pominięciu znikomej bezwładności magnetycznej amplidyne w porównaniu do bezwładności magnetycznej generatora napięcie na uzwojeniu wzbudzenia generatora ustala się przy praktycznie nie zmienionym na początku rozruchu napięciu generatora. Tym samym otrzymany w powyższych rozważaniach przebieg prądu silnika przy założeniu stałego napięcia wzbudzenia generatora może posłużyć do przybliżonego wyznaczenia początkowego przebiegu prądu w głównym obwodzie zespołu Leonarda.

W wzorze przybliżonym (10) na obliczenie krotności prądu rozruchu napięcie E_{gu} oznacza wartość ustaloną napięcia wewnętrznego generatora odpowiadającąysterowaniu amplidyne ustaloną siłą magnetomotoryczną Θ_{su} (por. punkt 2).

Dla wyznaczenia maksymalnej wartości prądu I_{max} można posłużyć się wykresem $\frac{I_{\text{max}}}{E_{gu}/R} = f\left(\frac{T_e}{T_w}\right)$ przedstawionym na rysunku 6.

Wpływ obranego współczynnika forsowania na szybkość rozruchu omówiony jest oddzielnie w punkcie 8.

Przyjmując

$$\Theta_1 = k_f \Theta_{1a}$$

otrzymuje się z porównania ze wzorem (1)

$$R_2 = \frac{k_f - 1}{S W_2}.$$

Znając oporność wewnętrzną uzwojenia sterującego R_{2w} oraz oporność R_p prostownika P_w względnie P_N w kierunku przepuszczania¹, oblicza się

$$R_{d2} = R_2 - (R_{2w} + R_p). \quad (11)$$

Dla założonego przebiegu charakterystyki zewnętrznej silnika w zakresie prądów większych od prądu granicznego (zwykle wartość prądu granicznego obiera się rzędu $1,5 J_N$) oblicza się oporność bocznika w głównym obwodzie łącznie z opornością uzwojeń szeregowych, wychodząc ze wzoru (8):

$$R'_b = \frac{(\operatorname{tg} \alpha) C_s C_M \left(1 + S \frac{W_2}{R_2}\right) - (R_s + R_{ga}) - S R_3 \frac{W_2}{R_2}}{1 + S \frac{W_4}{R_4}}, \quad (12)$$

gdzie R_{ga} oznacza oporność wewnętrzną prądnicy zespołu Leonarda pomniejszoną o oporność uzwojeń szeregowych przyłączonych do prądowego układu porównawczego. Wartość oporności bocznika z opornością biegunów zwrotnych i kompensacji (jeżeli spadek napięcia na tych uzwojeniach zbierany jest do obwodu sterowania) mieści się zwykle w granicach $(0,03 \div 0,15) \frac{U_N}{J_N}$.

¹ Prostownik suchy selenowy względnie miedziowy przedstawia w kierunku przepuszczania opór nieliniowy prądowo-zależny. W przybliżeniu można przyjąć hyperboliczną zależność oporu od prądu obciążenia

$$R_p = \left(\frac{a}{F} + \frac{b}{I} \right) m,$$

gdzie

m — ilość szeregowo łączonych elementów prostowniczych,

F — czynna powierzchnia elementu prostownika,

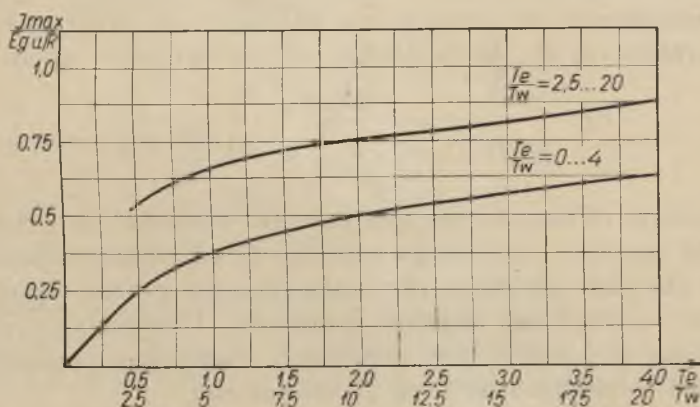
I — prąd prostownika.

Jak wykazały pomiary, dla prostowników selenowych można przyjąć średnio

$$a = 6,3 \Omega/\text{cm}^2,$$

$$b = 0,6 \text{ V}.$$

Większe oporności bocznika powodują zmniejszenie sprawności zespołu Leonarda, co odbija się na całkowitym bilansie energetycznym urządzenia, w szczególności przy napędach znacznych mocy. W celu zmniejszenia koniecznej wartości oporności R_b należy powiększyć wzmocnienie prądowego uzwojenia sterującego. Dla napędów znacznych mocy często nie wtrąca się dodatkowych oporności w obwód główny i ogranicza się tylko do oporności uzwojeń szeregowych.



Rys. 6. Charakterystyka maksymalnego prądu rozruchowego w funkcji stałych czasowych układu Leonarda

Z wartości R_4 należy wstawić do wzoru (11) opór wewnętrzny prądowego uzwojenia sterującego amplidyneu (przyjmuje się uzwojenie o małym oporze wewnętrznym i dużej objętości miedzi) powiększony o oporność wewnętrzną prostowników układu porównawczego oraz oporności potencjometru (rys. 1).

Oporność wewnętrzną prostowników stykowych należy oszacować podobnie jak poprzednio przy obliczaniu R_{d2} ¹. Oporność potencjometru utworzona jest przez równoległą kombinację części oporności, z której zbierane jest napięcie porównawcze, oraz reszty potencjometru wraz z opornością wewnętrzną źródła.

Przy pominięciu oporności źródła oraz oporności wstępnych potencjometru wartość ta równa jest praktycznie połowie całkowitej oporności potencjometru.

Moc P_T wydzielana na potencjometrze określająca moc transformatora i prostowników układu porównawczego wynosi:

¹ W obliczeniu pomija się wpływ bocznikującego oporu upustowego R_u przyłączonego równoległe do oporności wewnętrznej prostownika i oporności wstępnej potencjometru. Po obliczeniu oporności R_b można dodatkowo skorygować wartość oporności R_4 .

$$P_T \approx 2 \cdot \frac{(I_q R'_b)^2}{R_x},$$

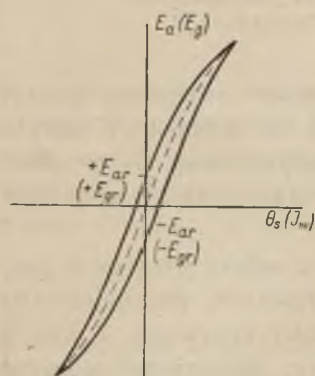
$$R_x = \rho \cdot R_4,$$

gdzie R_x określa oporność wewnętrzną połowy gałęzi potencjometru, wchodzącą w skład oporności obwodu prądowego uzwojenia sterującego (ρ przyjmuje się przeciętnie w granicach $0,1 \div 0,5$).

Nachylenie charakterystyki wewnętrznej silnika $\operatorname{tg} \beta$ w zakresach obciążeń mniejszych od granicznego uzyskuje się przez zastosowanie oporności upustowej R_u , którą oblicza się na podstawie wzoru (9):

$$R'_4 = \frac{S R'_b W_4}{\operatorname{tg} \beta C_s C_M \left(1 + S \frac{W_2}{R_2}\right) - S R_s \frac{W_2}{R_2} - R} \quad (13)$$

W obliczeniu elementów przy hamowaniu wychodzi się z dopuszczalnej wartości napięcia resztkowego prądnicy E'_g określonej dopuszczalnym prądem w obwodzie głównym przy zatrzymanym silniku. Przebieg charakterystyki wewnętrznej napięcia generatora i amplitudyny w okolicy napięcia remanentu można przy pominięciu prądowego sprzężenia zwrotnego określić w przybliżeniu (rys. 7) równaniem:



Rys. 7. Pętlica histerezy napięcia amplitudyny względnie generatora

$$E_a = \pm E_{gr} + S_a \Theta_s,$$

$$E_x = \pm E_{gr} + \frac{E_d W}{R_w} S_g.$$

Wstawiając

$$\Theta_s = -\frac{E_d W_1}{R_1} - U_s \frac{W_2}{R_2}$$

otrzymuje się po przekształceniu przy przyjęciu najgorszego wypadku zgodnego kierunku remanentu generatora i amplitudyny¹

$$E'_g = \frac{E_{gr} + E_{ar} \frac{S_g}{1 + S_a \frac{W_1}{R_1}} \frac{W}{R_w}}{1 + S \frac{W_2}{R_2} \frac{1}{1 + S_a \frac{W_1}{R_1}}} \quad (14)$$

¹ W zasadzie w czasie hamowania (por. pkt 6) napięcie amplitudyny zmienia znak, powodując przeciwny znak remanentu, amplitudyny i generatora. Należy jednak przewidzieć wypadek, gdy nastąpi chwilowe załączenie nastawnika na rewersowanie i powrotne wyłączenie, w czasie którego napięcie amplitudyny zmieni znak, podczas gdy napięcie generatora wskutek dużej bezwładności magnetycznej uzwojenia wzbudzenia pozostanie bez zmiany.

Drugie równanie wyznaczające wartości oporności R_1 i R_2 uzyskuje się z przyjętego stopnia intensywności hamowania określonego współczynnikiem forsowania amplidyny w pierwszym okresie hamowania.

Wobec znikomej stałej czasowej amplidyny w porównaniu do przeważającej stałej czasowej obwodu wzbudzenia zrewersowane napięcie amplidyny E_{ah} ustali się przy praktycznie nie zmienionej w pierwszej chwili wartości napięcia generatora E_{g0} .

Stąd przy pominięciu wewnętrznych spadków napięć w tworniku generatora i amplidyny otrzymuje się:

$$E_{ah} = S_a \Theta_{sh} = S \left(\frac{E_{ah}}{R_1} W_1 - \frac{E_{g0}}{R_2} W_2 \right),$$

skąd po przekształceniu:

$$\Theta_{sh} = \frac{E_g W_2}{R_2' \left(1 + S_a \frac{W_1}{R_1} \right)},$$

Przyjmując współczynnik forsowania przy hamowaniu k_{fh} wyrażony jako stosunek amperozwojów amplidyny w pierwszej fazie hamowania do wypadkowych amperozwojów odpowiadających napięciu prądnic E_{g0}

$$k_{fh} = \frac{\Theta_{sh}}{\Theta_{s0}} = \frac{S W_2}{R_2 \left(1 + S_a \frac{W_1}{R_1} \right)}, \quad (15)$$

otrzymuje się z porównania wzorów (14) i (13)

$$E_g' = \frac{E_{gr} + E_{ar} \frac{k_{fh} R_2}{S_a W_2}}{1 + k_{fh}}. \quad (16)$$

Równanie (14) i (15) określa wartość R_1 i R_2 przy przyjętym współczynnikiem forsowania i tym samym odnośnie do oporności dodatkowe R_{g1} i R_{g2} . Przyjęty współczynnik forsowania powinien zapewnić szybkie osiągnięcie prądu granicznego w celu uzyskania intensywnego hamowania powyżej prądu granicznego; należy go sprawdzić wzorem przybliżonym¹:

$$\frac{J_{\max}}{I_N} = \frac{k_{fh} \cdot E_{g0}}{R J_N} \frac{T_e}{T_w - T_e} \left(\frac{T_e}{T_h} \right)^{\frac{r_e}{T_w - T_e}} > I_g$$

lub z wykresu na rysunku 6.

¹ Uwzględnienie warunków początkowych napięcia generatora przy hamowaniu daje w rezultacie wynik identyczny jak dla rozruchu, co zresztą fizykalnie jest oczywiste.

8. Analiza stanu nieustalonego

Dobór pozostałych elementów układu opiera się o analizę stanu nieustalonego. W rozważaniach pomija się bezwładność magnetyczną pierwszego stopnia wzmocnienia amplidyny oraz wpływ indukcyjności wzajemnych poszczególnych obwodów sterujących na siebie, co wskutek wtrącenia dodatkowych oporności w obwodach sterujących stanowi praktycznie zupełnie bliskie przybliżenie.

Zakłada się na wstępie dokładne skompensowanie amplidyny¹. Układ regulacyjny można przedstawić za pomocą strukturalnego schematu ideowego, jak na rysunku 8. (Przyjmujemy dla dużego uproszczenia analizy liniowe charakterystyki magnesowania amplidyny, wzbudnicy i prądnicę w całym zakresie wysterowania).

Każdy z elementów układu scharakteryzowany jest swoją funkcją przejścia przedstawioną operatorowo.

Jako funkcję przejścia $K(p)$ uważa się funkcję przebiegu wielkości wyjściowej $y(p)$ elementu przy przyłożeniu jednostkowej wielkości wejściowej wyrażonej w postaci czasowej $X(t) = 1(t) = \frac{t + (t)}{2 \cdot t}$ względnie operatorowej² $x(p) = 1$.

Dla dowolnej postaci wielkości wejściowej $x(p) = 1$ wielkość wyjściowa $y(p) = x(p)K(p) \cdot 1$.

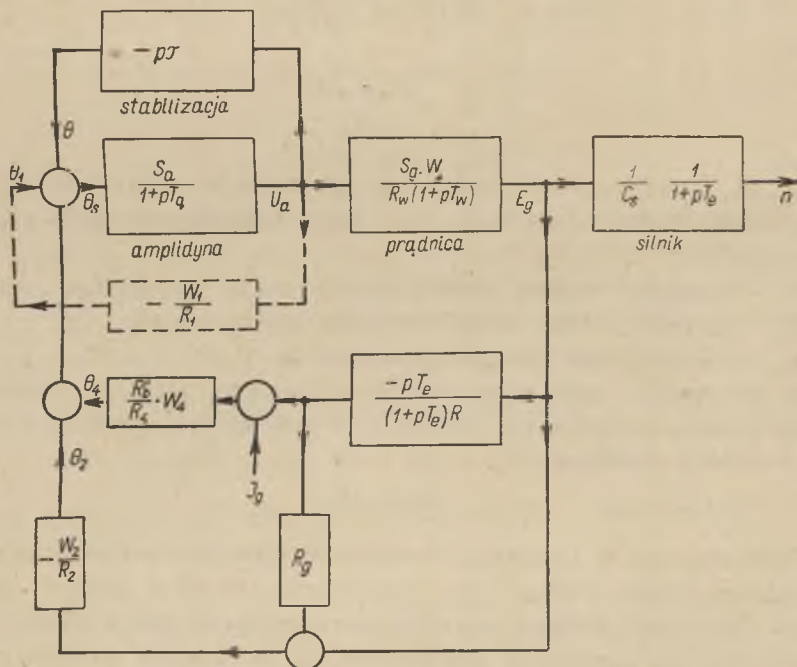
Rozróżnia się typowe elementy układów regulacyjnych nacechowane wspólną formą funkcji przejścia (przy założeniu zerowych warunków początkowych):

¹ Skompensowanie amplidyny sprowadza się do zrównoważenia oddziaływania twornika amplidyny 2 stopnia wzmocnienia z amperozwojami uzwojenia kompensacyjnego. Przy dokładnej kompensacji prąd obciążenia amplidyny nie zmienia SEM wewnętrznej drugiego stopnia wzmocnienia. Obniżka napięcia wyjściowego przy obciążeniu spowodowana jest wówczas tylko spadkiem napięcia na oporności wewnętrznej oraz oporności przejścia szczotek w osi podłużnej. Uzyskanie idealnej kompensacji przez zaprojektowanie ilości zwojów uzwojenia kompensacyjnego dokładnie odpowiadającej reakcji twornika jest praktycznie niemożliwe (oprócz konstrukcyjnych trudności osiągnięcia takiej dokładnej kompensacji wpływ nasycenia obwodu magnetycznego zmienia stan skompensowania amplidyny). Praktycznie przyjmuje się zwiększoną nieco liczbę zwojów (o 1% ÷ 3%) uzwojenia kompensacyjnego zwieranego regulowanym oporem bocznikującym. W stanie ustalonym otrzymuje się wówczas dokładną kompensację.

Niemniej jednak w stanie nieustalonym, kiedy dla rozptywu prądu w uzwojeniu kompensacyjnym i oporze bocznikującym decyduje oprócz oporności czynnej również oporność indukcyjna, kompensacja nie jest dokładna. W niniejszym artykule pomija się nieznaczny wpływ oporności bocznikującej uzwojenia kompensacyjnego.

² Dla $t < 0$, $I(t) = 0$ (funkcja 1 określana będzie jako funkcja jednostkowa); dla $t \geq 0$, $I(t) = 1$.

- 1) element inercyjny $K(p) = \frac{K}{1+pT}$,
- 2) element oscylacyjny $K(p) = \frac{K}{p^2 + 2\alpha p + (\alpha^2 + \beta^2)}$,
- 3) element całkujący $K(p) = \frac{K}{p}$,
- 4) element różniczkujący $K(p) = Kp$,
- 5) element bezinercyjny wzmacniający $K(p) = K$.



Rys. 8. Schemat strukturalny układu regulacyjnego

Amplidyna przedstawia przy podanych uprzednio założeniach element inercyjny układu¹. Przyjmując za wielkość wejściową amperozwoje sterujące Θ_s , za wyjściową napięcie wewnętrzne drugiego stopnia wzmacnienia amplidyny E_a , otrzymuje się:

$$E_a = S_{a1} \Theta_s,$$

$$E_a = J_q R_q + p L_q J_q - p L_q J_{q0},$$

$$E_a(p) = J_q W_q S_{02},$$

¹ Ściślej, amplidyna jako wzmacniacz dwustopniowy przedstawia 2 elementy inercyjne, przy czym przy pominięciu stałych czasowych obwodów sterowania pierwszy stopień wzmacnienia przechodzi w element bezinercyjny wzmacniający.

stąd

$$E_d(p) = \frac{S_{a1} S_{a2} W_g}{R_g (1 + pT_g)} \Theta_s(p) + \frac{T_g p J_{q0} S_{a2} W_g}{1 + pT_g}. \quad (17)$$

Indeks 0 przyjmuje się dla zaznaczenia warunków początkowych.

Przyjmując jednostkowy przebieg $\Theta_s(p) = 1$ otrzymuje się przy zerowych warunkach początkowych ($I_{q0} = 0$) funkcję przejścia amplitudyny

$$K(p) = \frac{S_a}{1 + pT_q},$$

gdzie

$$S_a = \frac{S_{a1} S_{a2} W_q}{R_q}; \quad (18)$$

S_{a1}, S_{a2} – nachylenia charakterystyki napięcia wewnętrznego względem amperozwojów wzbudzenia pierwszego i drugiego stopnia wzmocnienia amplitudyny,

R_q – oporność czynna obwodu poprzecznego amplitudyny,

W_q – zastępuje ilość zwojów obwodu poprzecznego,

L_q – indukcyjność obwodu poprzecznego.

W przypadku gdy stałą czasową drugiego stopnia wzmocnienia można pominąć, amplitudyna przechodzi w bezinercyjny element wzmacniający o funkcji przejścia

$$K(p) = S_a.$$

Prądnica zespołu Leonarda przedstawia jako skompensowana maszyna bocznikowa prądu stałego (przy pominięciu obwodów prądów wirowych jarzma i biegunów) element inercyjny przy przyjęciu jako wielkości wejściowej napięcia na uzwojeniu wzbudzenia E_a , a napięcia wewnętrznego E_g jako wielkości wyjściowej (ściśle E_a przedstawia napięcie wewnętrzne amplitudyny przy włączeniu oporności wewnętrznej amplitudyny do obwodu uzwojenia wzbudzenia amplitudyny):

$$E_g = S_g W I_w,$$

$$E_a(p) = R_w I_w (1 + pT_w) - pT_w R_w I_{w0},$$

stąd

$$E_g(p) = \frac{E_a(p) S_g W}{R_w} \frac{1}{1 + pT_w} + \frac{p I_{w0} T_w S_g W}{1 + pT_w}. \quad (19)$$

Dla

$$I_{w0} = 0$$

otrzymamy

$$K(p) = \frac{S_g W}{R_w} \frac{1}{1 + pT_w}. \quad (20)$$

Analogicznie dla silnika zespołu Leonarda otrzymuje się przy pominięciu znikomej indukcyjności w obwodzie głównym

$$n(p) = E_g(p) \frac{1}{C_s} \frac{1}{1 + pT_e} + \frac{p \cdot n_0 T_e}{1 + pT_e}. \quad (21)$$

Stąd dla $n_0 = 0$

$$K(p) = \frac{1}{C_s} \frac{1}{1 + pT_e}, \quad (22)$$

$$I(p) = \frac{E_g(p)}{R} \frac{pT_e}{1 + pT_e} - \frac{n_0 C_s}{R} \frac{pT_e}{1 + pT_e}. \quad (23)$$

Dla elementu prądowego sprzężenia zwrotnego¹

$$K(p) = \frac{1}{R} \frac{pT_e}{1 + pT_e}.$$

Dla transformatora stabilizacyjnego, którego strona pierwotna przyłączona jest na napięcie amplidyny (wielkość wejściowa), strona wtórna na uzwojenie sterujące (wielkość wyjściową przedstawiają amperozwoje sterujące Θ_3), otrzymuje się przy oznaczeniu parametrów strony pierwotnej indeksem 1, a strony wtórnej indeksem 2:

$$\begin{aligned} U_a(p) &= I_1(p) (R_{s1} + pL_1) + I_2(p) M - pL_1 I_{10} - pM I_{20}, \\ 0 &= I_1(p) pM + I_2(p) (R_{s2} + pL_2) - pML_{10} - pL_2 I_{20}. \end{aligned} \quad (24)$$

Przy pominięciu indukcyjności rozproszenia transformatora stabilizującego ($M^2 = L_1 L_2$) otrzymuje się

$$\frac{-pM}{R_{s1} R_{s2}} U_a(p) = I_2(p) [(T_1 + T_2)p + 1] - (I_{20} + I_{10} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}) pT_2,$$

gdzie

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{L_1}{R_{s1}}, \\ T_2 &= \frac{L_2}{R_{s2}}. \end{aligned}$$

Przy zerowych warunkach początkowych $I_{10} = I_{20} = 0$

$$\Theta_3 = -U_a(p) \frac{pM}{R_{s1} \cdot R_{s2}} W_3 \frac{1}{1 + p(T_1 + T_2)}.$$

¹ Element ten można przedstawić jako szeregowe połączenie elementu inercyjnego $\left[K(p) = \frac{1}{1 + pT_e} \right]$ i różniczkującego $\left[K(p) = \frac{pT_e}{R} \right]$.

Wskutek znacznych oporności R_{s1} i R_{s2} stałe czasowe T_1 i T_2 maleją tak, że praktycznie transformator stabilizacyjny przedstawia element różniczkujący o funkcji przejścia

$$K(p) = -p \frac{W_3 M}{R_{s1} R_{s2}} = -p\tau. \quad (25)$$

Ponieważ napięcie na zaciskach amplitudyny U_a można w dużym przybliżeniu przyjąć równe napięciu wewnętrznemu amplitudyny, otrzymana funkcja przejścia charakteryzuje element stabilizacyjny z dostateczną dokładnością. Przy niezerowych warunkach początkowych można przyjąć praktycznie

$$I_2 \approx \frac{-pM}{R_{s1} R_{s2}} U_d(p) + \frac{pM U_{a0}}{R_{s1} R_{s2}}. \quad (26)$$

Elementy oporowe figurujące w schemacie strukturalnym przedstawiają elementy bezinercyjne. Biorąc pod uwagę, że wypadkowa funkcja przejścia 2 elementów łączonych łańcuchowo w kierunku zaznaczonym strzałkami¹ jest iloczynem składowych funkcji przejścia oraz że w oznaczonych kółkach węzłach układu regulacyjnego następuje sumowanie wielkości wyjściowych lub wejściowych, otrzymuje się dla zerowych warunków początkowych

$$n(p) \frac{C_s}{S} \left\{ (1 + pT_w)(1 + pT_e)[1 + p(S_a\tau + T_q)] + \right. \\ \left. + \frac{W_2}{R_2} S \left(1 - \frac{R_2}{R} \right) pT_e + \frac{R'_b}{R} \frac{W_4}{R_4} SpT_e + \frac{W_2}{R_2} S \right\} = \Theta_1 + I_g \frac{R'_b}{R_4} W_4. \quad (27a)$$

Stąd funkcja przejścia wyraża się przy przyjęciu wartości $\left(\Theta_1 + I_g \frac{R'_b}{R_4} W_4 \right)$ jako wielkości wejściowej:

$$K(p) = \frac{S}{C_s p^3 T_w T_e T_s + p^2 (T_w T_e + T_w T_s + T_s T_e) + p (T_s + T_w + T_e + N) + M}, \quad (27b)$$

gdzie

$$N = \left[\frac{W_2}{R_2} \left(1 - \frac{R_2}{R} \right) + \frac{R'_b}{R} \frac{W_4}{R_4} \right] S T_e,$$

$$M = 1 + \frac{W_2}{R_2} S = k_f,$$

$$T_s = T_q + \tau S_a.$$

¹ Elementy łączone łańcuchowo związane są odnośnymi funkcjami przejścia dla zaznaczonych na rysunku 7 kierunków

Ze względu na obecność prostowników w układzie regulacyjnym, zmieniających parametry po przekroczeniu prądu granicznego, należy rozpatrzeć układ osobno dla różnych wartości elementów składowych.

W dotychczasowych rozwiązaniach przyjęto dokładne skompensowanie amplidyńy. Niedokompensowanie wzmacniacza równoznaczne jest ujemnemu sprzężeniu od prądu wyjściowego, który z kolei przy poczynionych założeniach proporcjonalny jest do napięcia wewnętrznego generatora. Tym samym niedokompensowanie wzmacniacza równoznaczne jest praktycznie z napięciowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym układu.

Z tej przyczyny stosuje się często w tego rodzaju układach niedokompensowanie amplidyńy, przez co zmniejsza się konieczne napięciowe sprzężenie zwrotne (wystarczy słabsze uzwojenie sterujące II).

W takich wypadkach ujemne sprzężenie zwrotne (proporcjonalne praktycznie do wewnętrznego napięcia generatora) spełnia tylko rolę ograniczenia forsowania amplidyńy w miarę narastania obrotów silnika i nie jest przeznaczone do kształtowania charakterystyki zewnętrznej silnika.

Analiza mianownika funkcji przejścia, który można przedstawić w postaci $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3$, pozwala ocenić jakość przebiegów bez konieczności rozwiązania równania algebraicznego trzeciego stopnia¹.

Warunek pierwiastków równania trzeciego stopnia, nie leżących w prawej płaszczyźnie liczb zespolonych, a zatem warunek stateczności, określa wyznacznik Routha-Hurwitza²:

$$\begin{vmatrix} a_1, a_3 \\ a_0, a_2 \end{vmatrix} > 0 \quad \text{oraz} \quad a_1 > 0, a_3 > 0, a_0 > 0.$$

¹ Ze względu na trzeci stopień wyrażenia w mianowniku funkcji przejścia oraz dodatkowy warunek zmian parametrów po przekroczeniu prądu granicznego szczególne przedstawienie postaci czasowej przebiegów nastęrcza znaczne trudności, zmuszając do wyznaczenia pierwiastków mianownika oraz wartości początkowych po osiągnięciu prądu granicznego.

² Ogólnie operatorową funkcję przebiegu nieustalonego z uwzględnieniem warunków początkowych wyrazić można za pomocą skończonej sumy ułamków prostych

$$F(p) = A_0 + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{A_k}{p - p_k},$$

gdzie p_k oznacza pierwiastki (ogólnie liczby zespolone) mianownika funkcji przejścia.

Stąd po przejściu na postać czasową otrzymuje się $F(t) = B_0 + \sum_{k=1}^{k=n} B_k e^{p_k t}$.

Przebiegi są tłumione, gdy wartości rzeczywiste pierwiastków są większe od zera. Ponieważ pierwiastki zespolone występują zawsze parami sprzężone, pierwiastki takie wyznaczają przebiegi oscylacyjne. Gdy pierwiastki wyrażają się tylko liczbami rzeczywistymi, przebieg czasowy jest aperiodyczny.

Dla omawianego przypadku żąda się zwykle stateczności, ponadto spełnienia warunku przebiegów aperiodycznych. Konieczne warunki stateczności aperiodycznej określają nierówności Eulera¹:

$$a_1^2 > 3a_0 a_2,$$

$$a_2^2 > 3a_1 a_3.$$

Powyższe nierówności Eulera przedstawiają jedynie warunki konieczne, lecz niedostateczne stateczności aperiodycznej. Warunek konieczny i dostateczny układu 3 stopnia określa nierówność Wysznegradzkiego

$$4 \left[a_2^3 + \frac{a_3 a_1^3}{a_0} \right] - \frac{a_1^2 a_2^2}{a_0} - 18 a_1 a_2 a_3 + 27 a_3^2 a_0 > 0.$$

Ponieważ w praktyce bardzo żmudnie operuje się nierównością Wysznegradzkiego (dla układów wyższych stopni warunki konieczne i dostateczne stateczności aperiodycznej są jeszcze bardziej skomplikowane), bada się często układy regulacji ze względu na dobór parametrów na podstawie nierówności Eulera mając na uwadze pozostawienie zapasu w możliwościach nastawień układu w kierunku majoryzowania nierówności Eulera. Po dokonaniu doboru parametrów na podstawie dokonanej analizy sprawdza się, już dla konkretnych wartości współczynników wielomianu charakterystycznego wynikających z dokonanego doboru parametrów układu, czy warunek Wysznegradzkiego jest spełniony.

Podstawiając odnośne współczynniki mianownika funkcji przejścia otrzymuje się:

$$[T_s(T_w + T_e) + T_e T_w]^2 \geq 3 T_s T_w T_e (T_s + T_w + T_e + N), \quad (28)$$

$$(T_s + T_w + T_e + N)^2 \geq 3M [T_s(T_w + T_e) + T_w T_e]. \quad (29)$$

Poza wyznaczonymi uprzednio z założonej statycznej charakterystyki zewnętrznej parametrami układu pozostaje do określenia wartość T_s , którą można regulować zmianą oporności R_d transformatora stabilizacyjnego, wielkością szczeliny, zaczeпами na transformatorze stabilizacyjnym.

Traktując T_s jako niewiadomą, otrzymuje się z nierówności (28), (29):

$$0 < T_s < \frac{[(T_w + T_e) + 3N] - \sqrt{3 \sqrt{[3N + 2(T_w + T_e)]N - (T_w + T_e)^2}}}{2(T_w^2 - T_w T_e + T_e^2)}, \quad (28a)$$

$$T_s >$$

$$> \frac{(3M-2)(T_w+T_e)-2N-\sqrt{9M^2(T_w+T_e)^2-12M[T_w^2+T_e^2+T_w T_e+N(T_w+T_e)]}}{2}. \quad (29a)$$

¹ Ogólnie dla równania n -tego stopnia $a_k^2 \geq \left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(1 + \frac{1}{n-k}\right) a_{k+1} \cdot a_{k-1}$.

Mniejsza z określonych tymi nierównościami wartość T_s spełnia warunek aperiodycznej stateczności. W przypadku gdy wyrażenie podpierwiastkowe jest ujemne, każda wartość T_s spełnia odnośną nierówność Eulera¹.

O zachowaniu warunków aperiodyczności decyduje praktycznie zawsze przebieg leżący poniżej prądu granicznego. Dla tego zakresu pracy należy wstawić do wzorów

$$J_g = 0, \quad R_4 = R_4'.$$

Na przykładzie rozpatrzy się dobór stabilizacji istniejącego układu regulacyjnego Leonarda przy przyjętym współczynniku forsowania $k_f = 5$. Dane:

$$\operatorname{tg} \beta C_s C_M = 6 R_s,$$

$$R_b' = 3 R_s,$$

$$R_{ga} = \frac{1}{2} R_s.$$

Stała czasowa układu:

$$T_e = 0,1 \text{ sek.}$$

$$T_w = 1 \text{ sek.}$$

$$S R_b' \frac{W_4}{R_4'} = \operatorname{tg} \beta C_s C_M k_f - R - (k_f - 1) R_s = 21,5 R_s,$$

$$N = \left[(k_f - 1) \left(1 - \frac{R_g}{R} \right) + S \frac{R_b'}{R} \frac{W_4}{R_4'} \right] T_e = 0,57 \text{ sek.}$$

Z nierówności (28a) i (29d) wynika:

(28a) \rightarrow każda wartość T_s spełnia nierówność,

(29d) $\rightarrow T_s > 0,28 \text{ sek.}$

Przyjmując $T_q = 0,15 \text{ sek}$ otrzymuje się $S_d \tau = 0,13 \text{ sek}$. Stąd według wzoru (25) przy znanym R_{s1} wyznacza się R_{s2} i tym samym R_{d2} .

Sprawdzenie układu regulacyjnego za pomocą nierówności Wysznegradzkiego wykazuje zachowanie koniecznych i dostatecznych warunków stateczności aperiodycznej i

$$a_0 = 0,028,$$

$$a_1 = 0,408,$$

$$a_2 = 1,95,$$

$$a_3 = 5,$$

¹ Powyższe graniczne wartości T_s stanowią rozwiązanie nierówności (28) i (29) przy założeniu przeciętnie spotykanych wartości stałych czasowych T_w, T_s, N oraz przeciętnego współczynnika forsowania $k_f = M$ dla rozruchu. Ogólnie dodatnia wartość T_s powinna leżeć poza przedziałem zawartym między pierwiastkami trójmianu kwadratowego nierówności (28), (29).

$$4\left(1,95^3 + \frac{5 \cdot 0,408^2}{0,028}\right) - \frac{0,408^2 \cdot 1,95^2}{0,028} - 18 \cdot 0,408 \cdot 1,95 \cdot 5 + 27,5^2 \cdot 0,028 = \\ = 4(7,3 + 12) - 22,5 - 71,5 + 18,8 = 1,8 > 0.$$

Przy braku oporności upustowej R_u ($N=0$) nierówność (29) Eulera nie jest spełniona, układ wykazuje przebieg oscylacyjny. Jak widać z powyższego przykładu, przyjęcie oporności upustowej jest konieczne dla zachowania warunków aperiodyczności. Jeżeli zachodzi trudność otrzymania przebiegu aperiodycznego, warunek Routha-Hurwitza określa warunek stateczności układu:

$$T_s^2(T_w + T_e) + T_s[T_w T_e + (T_w + T_e)^2 + N(T_w + T_e)^2 - MT_e T_w] + \\ + T_e T_w (T_w + N) > 0.$$

Ponieważ dla $T_s=0$ nierówność jest zawsze spełniona, warunek stateczności przy stosowanych przeciętnie współczynnikach forsowania jest praktycznie zawsze zachowany.

Dla przebiegów prądu głównego obwodu leżącego powyżej prądu granicznego J_g wartość N rośnie kilkunasto- a nawet kilkudziesięciokrotnie, powodując praktycznie zawsze zachowanie warunków aperiodyczności. Analiza funkcji przejścia pozwala również na przybliżoną ocenę czasu rozruchu dla przypadku, gdy okres obcinania charakterystyki prądu rozruchu przy prądach przekraczających wartość graniczną stanowi nieznaczny stosunek czasu rozruchu¹.

Zastępuje stała czasowa monotonicznego² przebiegu wyjściowego układu $Y(t)$ (w rozpatrywanym przypadku przebiegu obrotów silnika

¹ Przy napędach dużych mocy często nie osiąga się przy rozruchu prądu granicznego i oszacowanie czasów rozruchu za pomocą zastępczej stałej czasowej daje praktycznie dobre wyniki.

² Cecha monotoniczności przebiegów analizowanego układu regulacyjnego stanowi szczególnie wypadek ogólnego twierdzenia dla układu opisanego równaniem różniczkowym n -tego rzędu o zerowych warunkach początkowych dla pochodnych $1, \dots, 2, \dots, (n-1)$ rzędu wielkości wyjściowej przy zachowaniu warunków stateczności aperiodycznej. Można wykazać, że jeżeli układ regulacyjny n -tego rzędu wykazuje monotoniczne przebiegi wielkości wyjściowej $y_n(t)$ przy zachowaniu $y_n^{(k)}(0) = 0$ dla $k = 1, 2, \dots, (n-1)$, wówczas układ rzędu $(n+1)$ o zerowych warunkach początkowych $y_{n+1}^{(k)}(0)$ dla $n = 1, 2, \dots, n$ i o tych samych pierwiastkach algebraicznego równania charakterystycznego (mianownika wyrażenia wielkości wyjściowej w postaci operatorowej) oraz jednym dodatkowym dowolnym rzeczywistym pierwiastku leżącym w lewej półpłaszczyźnie zespolonej daje również przebieg monotoniczny. Ponieważ układ regulacyjny drugiego rzędu wykazujący przebiegi aperiodyczne jest zawsze monotoniczny, układ opisany równaniem różniczkowym trzeciego rzędu powstały jak wyżej zaznaczono przez dodanie nowego rzeczywistego pierwiastka (ujemnego) przy zachowaniu zerowych warunków początkowych jest również monotoniczny. Przez indukcję matematyczną można to uogólnić na układ n -tego rzędu.

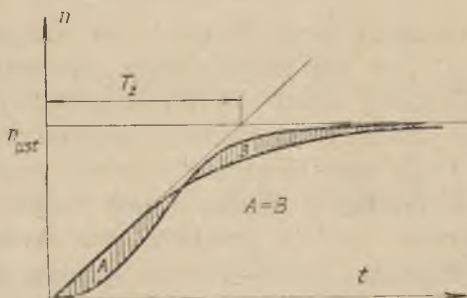
zespołu Leonarda) można wyrazić (rys. 9):

$$T_z = \int_0^{\infty} \frac{Y(\infty) - Y(t)}{Y(\infty) - Y(0)} dt = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p} \frac{y(0) - y(p)}{y(0) - y(\infty)},$$

gdzie

$$Y(t) \doteq y(p).$$

Jak zaznaczono na rysunku, fizyczny sens zastępczej stałej czasowej odpowiada zastąpieniu przebiegu zwykłą funkcją wykładniczą o tej samej powierzchni zawartej między krzywą przebiegu czasowego $Y(t)$ wielkości wyjściowej a prostą wartości ustalonej (rys. 9).



Rys. 9. Graficzna interpretacja układu regulacyjnego

Układ regulacyjny (zamknięty względnie otwarty przy przyłożeniu jednostkowej wielkości wejściowej) opisany równaniem różniczkowym trzeciego rzędu, spełniający warunki stateczności aperiodycznej, wykazuje równocześnie zawsze przebiegi monotoniczne wielkości wyjściowej, o ile w chwili $t=0$ znika pierwsza i druga pochodna wielkości wyjściowej. W rozpatrywanym wypadku układu Leonarda skutek bezwładności magnetycznej uzwojenia wzbudzenia generatora oraz drugiego stopnia wzmocnienia amplidyne występuje ciągłość pierwszej i drugiej pochodnej przebiegu obrotów silnika. Tym samym, po wyjściu przy rozruchu ze stanu spoczynku, zerowe warunki początkowe pierwszej i drugiej pochodnej przebiegu obrotów zapewniają przy zachowaniu stateczności aperiodycznej układu jednocześnie przebieg monotoniczny obrotów od zera do obrotów ustalonych.

W wypadku ogólnym, gdy funkcja wyjściowa $y(p)$ w postaci operatorowej wyraża się funkcją ułamkową

$$K(p) = \frac{A_0 p^n + A_1 p^{n-1} + \dots + A_{n-1} p + A_n}{B_0 p^n + B_1 p^{n-1} + \dots + B_{n-1} p + B_n}, \quad (30)$$

zastępcza stała czasowa

$$T_z = \frac{\frac{B_{n-1}}{B_n} - \frac{A_{n-1}}{A_n}}{1 - \frac{A_0 B_n}{A_n B_0}}.$$

Na podstawie równania (27) otrzymuje się

$$T_z = \frac{T_s + T_e + T_w + N}{M}. \quad (30a)$$

Otrzymana wartość zastępczej stałej czasowej tłumaczy zwalniający wpływ sprzężenia zwrotnego oraz przyspieszający wpływ współczynnika forsowania $k_f = M$.

Jeżeli w czasie rozruchu silnik dłuższy czas utrzymuje prąd ponad wartością graniczną J_g (co ma miejsce przy znacznym współczynniku forsowania oraz stosunkowo dużej elektromechanicznej stałej czasowej), czas rozruchu należy przeliczyć dokładnie, uwzględniając zmianę parametru układu przy $I = I_g$ oraz zmienione warunki początkowe.

Dla praktycznych przeliczeń można często obejść się bez szukania pierwiastków mianownika funkcji przejścia oraz skomplikowanego rozwiązania trójwykładniczego i posłużyć się uproszczeniem, przyjmując równoznaczne przebiegi aperiodyczne określone równaniami pierwszego względnie drugiego rzędu¹:

$$E_g(p) = \frac{S(\Theta_1) + J_g \frac{R'_b}{R_4} W_4}{M} \cdot \frac{1}{1 + pT_z} + E_{g0} \frac{pT_z}{1 + pT_z}, \quad (31a)$$

$$I(p) = \frac{S\left(\Theta_1 + J_g \frac{R'_b}{R_4} W_4\right) pT_e}{M(1 + pT_z)(1 + pT_e)} + I_0 \frac{pT_e}{1 + pT_e}, \quad (31b)$$

przy czym dla przebiegów poniżej prądu granicznego należy wstawić $I_g = 0$ oraz odnośne wartości T_z, M, R_4 :

$$E_g(t) = \frac{S\theta_1 + J_g \frac{R'_b}{R_4} W_4}{M} (1 - e^{-\frac{t}{T_z}}) + E_{g0} e^{-\frac{t}{T_z}},$$

$$I(t) = \frac{S\left(\theta_1 + J_g \frac{R'_b}{R_4} W_4\right)}{M} T_e e^{-\frac{t}{T_w} - e^{-\frac{t}{T_e}}} + I_0 e^{-\frac{t}{T_e}}.$$

Łączny czas rozruchu (czas narastania prądu do wartości granicznej, czas trwania prądu ponadgranicznego i zaniku prądu do wartości ustalo-

¹ Transfiguracja odwrotna Heavyside'a wyznacza odnośne funkcje czasowe.

nej) oblicza się do umownej wartości napięcia E_g (zwykle do 0,9 wartości ustalonej).

Analogicznie jak dla rozruchu zespołu rozpatrzy się stan nieustalony hamowania. Na rysunku 8 zaznaczono linią kreskowaną zmianę schematu strukturalnego wskutek przełączenia podstawowego uzwojenia sterującego na napięcie wyjściowe amplidyny. Zespół Leonarda, stanowiący dla rozruchu układ regulacyjny otwarty (względem uzwojenia sterującego I) ze sprzężeniem zwrotnym, przechodzi tym samym w układ zamknięty sprowadzający układ do zerowych warunków w stanie ustalonym (przy pominięciu napięć remanentu).

Wielkość wejściowa układu zamkniętego wyraża się za pomocą wielkości wyjściowych układu regulacyjnego. W rozpatrywanym wypadku

$$\Theta_1 = -\frac{U_a}{R_1} W_1.$$

Przy uwzględnieniu warunków początkowych układu zgodnie z wzorami (17), (19), (23), (26) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & E_g \left\{ T_w T_s T_e p^3 + \left(T_w T_s + T_w T_e + T_e T_s + T_w T_e \frac{W_1}{R_1} S_a \right) p^2 + \right. \\ & + \left[T_s + T_w + T_e + (T_w + T_e) S_a \frac{W_1}{R_1} + N \right] \cdot p + 1 + \frac{W_2}{R_2} S + \frac{W_1}{R_1} S_a = \\ & = S \left[I_s \frac{R'_b}{R_4} W_4 (1 + p T_e) + p \frac{n_0 C_s}{R} T_e \left(\frac{R'_b}{R_4} W_4 - \frac{R_g}{R_2} W_2 \right) + \right. \\ & + I_{w0} R_w T_w \tau p^2 (1 + p T_e) + p \tau U_{a0} (1 + p T_e) + p J_{w0} T_w R_w \frac{W_1}{R_1} \left. \right] + \\ & + S_g \left[\frac{W W_g}{R_w} T_q I_{q0} S_{a2} p (1 + p T_e) + I_{w0} T_w W p (1 + p T_e) (1 + p T_q) \right]. \quad (32) \end{aligned}$$

Warunki stateczności względnie stateczności aperiodycznej określa lewa strona równania, którą można prosto otrzymać bez kłopotliwego uwzględniania warunków początkowych, wychodząc ze znanej funkcji przejścia (27) układu przy rozruchu i podstawiając (por. rys. 8):

$$\Theta_1 = -\frac{U_d}{R_1} W_1 = -E_g \frac{R_w}{S_{gw}} (1 + p T_w) \frac{W_1}{R_1}.$$

Za wartość elementów układu należy wstawić odnośne zmienione przy hamowaniu parametry R_1 i R_2 oraz uwzględnić zmianę parametrów prądowego sprzężenia zwrotnego powyżej prądu granicznego.

Jeżeli okres obcinania charakterystyki prądu przy wartościach przekraczających prąd graniczny stanowi tylko nieznaczny ułamek łącznego czasu hamowania (zwykle za czas hamowania uważany jest czas do osią-

gnięcia 0,1 obrotów początkowych), zastępuje stała czasowa obliczona wzorem (30) daje przybliżoną ocenę szybkości hamowania.

Po przekształceniach wzoru (32) otrzymuje się wartość zastępczej stałej czasowej, przyjmując wartości początkowe odpowiadające ustalonym warunkom pracy

$$T_z = \frac{N + \varepsilon(T_w - k_{fh}T_e) + T_a}{\varepsilon(1 + k_{fh})}, \quad (33)$$

gdzie

$$\varepsilon = 1 + S_a \frac{W_1}{R_1}.$$

Z wzoru (33) można ocenić łatwo wpływ oporu obwodu uzwojenia sterującego I na szybkość hamowania. W granicy przy małych wartościach oporu R_{g1} w obwodzie sterującym I amplitudyny stałą czasową hamowania określa głównie stała czasowa wzbudzenia generatora oraz przyjęty współczynnik forsowania k_{fh} .

Powyższy układ hamowania, jak wynika z praktyki, nie zapewnia zwykle znacznej intensywności hamowania wskutek krótkiego czasu utrzymywania prądu ponad wartość graniczną i oszacowanie czasu hamowania na podstawie zastępczej stałej czasowej jest praktycznie wystarczające.

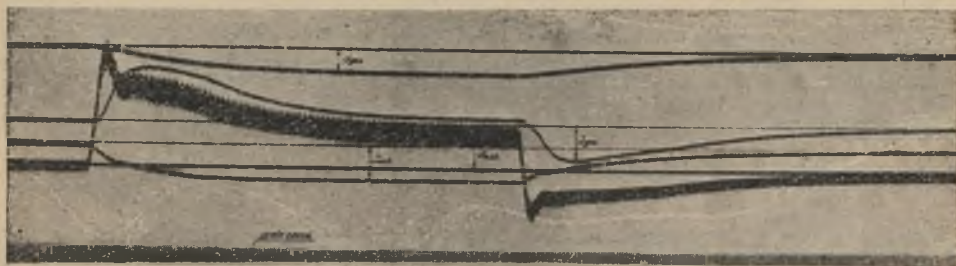
9. Przykłady pomiarów oscylograficznych

Dla ilustracji przeprowadzonej analizy stanów nieustalonych przytoczy się wyniki pomiarów oscylograficznych Zakładu Maszyn Elektrycznych dokonanych na napędach nowoczesnego zgniatacza wyposażonych w amplitudynowe układy sterowania wzbudzenia.

Rysunek 10 przedstawia oscylogram rozruchu i hamowania napędu nawrotnego samotoków zgniatacza. Układ sterowania odpowiada schematowi na rysunku 1 (z czynnym oporem upustowym R_u).

Generator układu Leonarda zasilą grupę pięciu silników samotoków pracujących równolegle. Generator mocy 300/350 kW, 230/460 V, 1300/1200 A, 1000 obr/min (napęd synchroniczny), wzbudzenie o prądzie znamionowym 5,6/15,2 A zasilane z amplitudyny mocy 10 kW, 230 V, 43,5 A, 1450 obr/min (napęd asynchroniczny). Silniki zespołu Leonarda
 2×17 kW, 220 V, 110 obr/min,
 2×90 kW, 220 V, 475 obr/min,
 100 kW, 220 V, 475 obr/min.

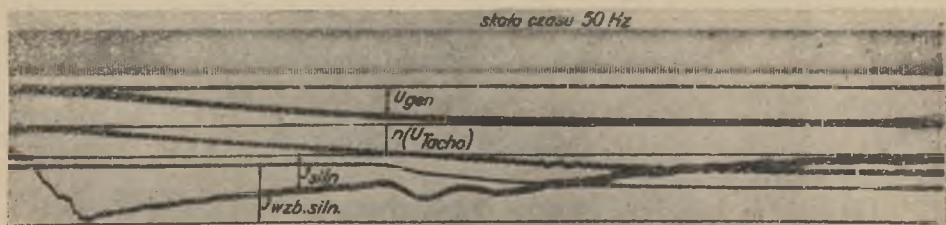
Na rysunku 11 na oscylogramach widoczna jest przy rozruchu (początki przebiegów) wysoka stromość napięcia amplitudyny (U_{wzb}) forsującego przebiegi prądu wzbudzenia generatora (I_{wzb}).



Rys. 10. Oscylogram rozruchu i hamowania napędu nawrotnego samotoków zgniatacza



Rys. 11. Wycinek oscylogramu pracy układu

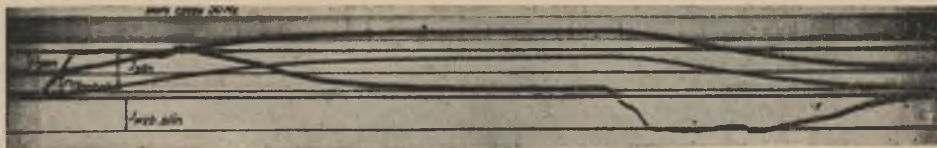


Rys. 12. Oscylogram rozruchu zespołu Leonarda głównego napędu zgniatacza

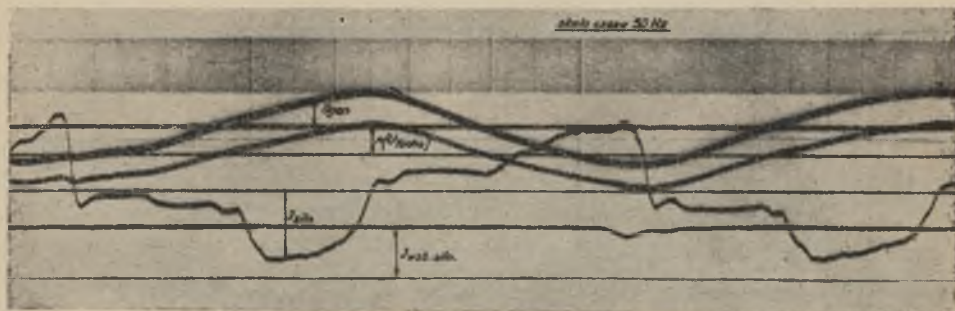
Po osiągnięciu prądu granicznego następuje szybkie obniżenie napięcia amplidyny, po czym napięcie maleje w miarę narastania obrotów silnika (ujemne sprzężenie napięciowe) do wartości ustalonej (pierwszy stopień szybkości).

W pierwszej chwili hamowania (koniec oscylogramu) znaczna stromość zrewersowanego napięcia amplidyny powoduje szybkie narastanie prądu generatora (I_{gen}), który po przekroczeniu wartości granicznej obniża napięcie wzmacniacza. Widoczna jest niekorzystna, malejąca, intensywność hamowania typowa dla przyjętego układu hamowania. Przebieg napięcia generatora (U_{gen}) reprezentuje jednocześnie obroty silnika (stałe wzbudzenie silnika na pierwszym i drugim stopniu).

Na rysunku 12 przedstawiono oscylogram rozruchu zespołu Leonarda głównego napędu zgniatacza.



Rys. 13. Oscylogram rewersowania zgniatacza na biegu jałowym



Rys. 14. Oscylogram pracy zespołu nawrotnego przy pierwszych przepustach walcowania wlewka

Generator zespołu Leonarda: 2 prądnice połączone równolegle: $P = 2 \times 3000$ kW, $U = 750$ V, $I = 2 \times 4000$ A, $n = 330/375$ obr/min, wzbudzenie obce $I_{wzb} = 160/110$ A.

Wzbudnica generatora: $P = 110$ kW, $U = 400$ V, $I = 275$ A, wzbudzenie obce ($I_{wzb} = 23$ A) zasilane z amplidyndy $P = 10$ kW, $U = 230$ V, $I = 43,5$ A, $n = 1450$ obr/min.

Silnik zespołu Leonarda: $P = 4416$ kW, $U = 750$ V, $I = 6400$ A, $n = 50/120$ obr/min, wzbudzenie obce:

$$I_{wzb} = 420 \text{ A} \quad \text{dla} \quad 50 \text{ obr/min,}$$

$$100 \text{ A} \quad \text{dla} \quad 120 \text{ obr/min.}$$

Wzbudnica silnika: $P = 72$ kW, $U = 750/300$ V, $I = 480$ A, $n = 975$ obr/min, wzbudzenie obce ($I_{wzb} = 13,5$ A) zasilane z amplidyndy $P = 10$ kW, $U = 230$ V, $I = 43,5$ A.

Zasadę układu wzbudzenia i sterowania dla powyższego przypadku omówiono pobieżnie w punkcie 1 (rys. 3). Sprężenie prądowe zwrotne pracuje w układzie porównawczym bez oporu upustowego, przy czym w czasie rozruchu jest blokowane układem styczników wtrącających sprężenie zwrotne jedynie na okres hamowania i rewersowania. Przetężenia w obwodzie głównym w czasie pracy zespołu powodują wzmocnienie pola silnika, którego wzbudzenie zasilane jest z generatora sterowanego amplidynowo,

przez co osiąga się zmniejszenie szczytowego prądu przy jednocześnie zwiększonym momencie. Szybkość rozruchu można w tym wypadku ściśle scharakteryzować wyznaczoną wyżej zastępczą stałą czasową ($N=0$)

$$T_z = \frac{T_s + T_w + T_e}{M}$$

W czasie rozruchu prąd osiąga wartość szczytową $4300 \text{ A} = 0,67 I_n$ po czasie 0,7 sek. Zastępcza stała czasowa rozruchu $T_z \approx 1,9$ sek. Wpływ obcinania prądu obwodu głównego wskutek działania prądowego sprzężenia zwrotnego widoczny jest na rysunku 13. Dla ilustracji załączono na rysunku 14 wycinek oscylogramu pracy powyższego zespołu nawrotnego przy pierwszych przepustach walcowania wlewka. Na oscylogramach poszczególne przebiegi licząc od góry oznaczają: skalę czasu 50 Hz., napięcie generatora U_{gen} zespołu Leonarda, obroży silnika (tachoprądnica) U_{tacho} , prąd obciążenia silnika I_{sil} i prąd wzbudzenia silnika $I_{\text{wzb sil}}$.

10. Wnioski

Mimo poczynionych uproszczeń analiza stanów nieustalonych jest znacznie skomplikowana i poza tym często ze względu na brak dokładnych danych odnośnie do stałych amplidyne, generatora i silnika zespołu Leonarda obliczenia nie zapewniają dostatecznie dokładnych rezultatów. W związku z tym rezygnuje się najczęściej w praktyce z dokładnej analizy i wyznacza się optymalne dane elementów układu drogą eksperymentu. W takich wypadkach pomiar oscylograficzny pracy układu jest najbardziej pomocny dla kontroli dokonanych nastawień. Obliczenia układu mają na celu w zasadzie określenie orientacyjnych wartości odpowiednich elementów, a dokładnych nastawień dokonuje się w trakcie końcowych prób układu. Analiza stanów nieustalonych daje jednakże pogląd na wpływ poszczególnych elementów układu regulacyjnego i ułatwia świadome eksperymentalne wyznaczenie optymalnych nastawień.

LITERATURA

- [1] A. В. Челюстин, Е. А. Розенман, *Автоматическое управление прокатными станками*, Москва 1950.
- [2] О. В. Слежановский, *Анализ системы управления блюмингом при помощи статических характеристик*, "Электричество" № 3 1953.
- [3] М. R. Jung, *Perfectionnements au couplage Ward-Leonard pour machines d'extraction par l'emploi d'une excitation amplidyne*, „Revue General d'Electricité“, Janvier 1948.
- [4] З. Ш. Блох, *Динамика линейных систем автоматического регулирования машин*, Гостехтеоретиздат, Москва 1952.
- [5] Б. В. Булгаков, *Коледания*, Гостехтеоретиздат, Москва 1949.