ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1964
Seria: ELEKTRYKA z. 19 Nr kol. 120

WIESŁAW GABRYŚ
Katedra Napędu Elektrycznego

ANALIZA OBWODÓW SPRZĘŻEŃ ZWROTNYCH UKŁADU LEONARDA Z AMPLIDYNĄ NAPĘDZAJĄCEGO MASZYNĘ WYCIĄGOWĄ

Streszczenie: W pracy przeanalizowano wpływ parametrów sprzężeń zwrotnych na właściwości statyczne i dynamiczne układu Leonarda z amplidyną, napędzającego krajową maszynę wyciągową 1100kw 45 ob/min. W oparciu o wyprowadzone wzory ogólne, jak również przeliczenia szczegółowe ilustrujące statyczne i dynamiczne właściwości układu, sformułowano praktyczne wnioski na temat konfrontacji teoretycznego badania stabilności z wynikami przeprowadzonych doświadczeń oraz podano kilka wskazań odnoszących się do projektowania i nastawiania sprzężeń zwrotnych w analogicznych układach.

1. WSTĘP

Przedmiotem pracy jest analiza obwodów sprzężeń zwrotnych układu Leonarda z amplidyną o mocy silnika 1100 kW, 45 og/min, służącego do napędu jednej z prototypowych maszyn wyciągowych, zainstalowanych na terenie GOP. Projektantem napędu jest Biuro Projektów Przemysłu Węglowego w Gliwicach. Podczas pomiarów wykonywanych w trakcie rozruchu maszyny napotkano kilka zja-

wisk, które były przyczyną początkowej nieprawidłowej pracy maszyny i utrudniały ostateczne wyregulowanie układu. Jako najważniejsze należy wymienić:

a) duży prąd remanentu, który nie zanikał pod wpływem ujemnego sprzężenia napięciowego obliczonego dla normalnej pracy (wykorzystanie cieplne uzwojenia sterującego amplidyny przy prędkości znamionowej),

b) kołysanie układu przy powiększaniu ujemnych sprzężeń zwrotnych w stanie zahamowanym, a w szczególności przy zawieraniu prostowników w obwodzie ujemnego sprzężenia prądowego z ograniczeniem (niszczenie remanentu, bądź też próby odwzbudzania awaryjnego tym sposobem),

c) stosunkowo nikły wpływ transformatorów stabilizujących na tłumienie kołysań układu (porównaj [1]).

Celem niniejszych rozważań jest pokazanie w jakim stopniu zaobserwowane zjawiska znajdują potwierdzenie w konkretnych przeliczeniach opartych o uproszczoną analizę napędu rozpatrywanego jako układ liniowy.

Uzyskany materiał porównawczy powinien umożliwić przynajmniej orientacyjną ocenę przydatności analizy liniowej do projektowania parametrów sprzężeń zwrotnych w analogicznych układach.

2. DANE TECHNICZNE UKŁADU

Maszyna wyciągowa: udźwig 7,2 t, prędkość 12 m/s, średnica koła pędnego 5 m, napęd bezpośredni.

Silnik wyciągowy prądu stałego: typ P-2880/16/730, 1100 kW, 45 ob/min, 650 V, 1900 A, wzbudzenie obce 220 V, 60 A.

Prądnica sterująca: typ P-1500/10/225, 1460 kW, 750 ob/min, 680 V, 2150 A, wzbudzenie obce 220 V, 18 A.

Amplidyna wzbudzająca prądnicę: typ PWMA 7D, 10 kW, 230 V, 43,5 A, 1460 obr/min, praca C, o 4 uzwojeniach sterujących. Uzwojenie zasilane z potencjometru steru ma dużą liczbę zwojów i dużą oporność z_s = 10000, r_s = 24200 omów, i_s = 2,5 mA, pozostałe 3 uzwojenia zasilane z obwodów sprzężeń zwrotnych są

praktycznie jednakowe o danych z = 360, i = 90 mA, r = 17,4 oma (uzwojenia prądowe), r = 15,6 oma (uzwojenie napięciowe). Stałe czasowe wszystkich uzwojeń są w przybliżeniu równe i wynoszą T_d = 0,25 sek.

Uproszczony schemat układu, uwzględniający tylko interesujące nas obwody, uwidoczniono na rys. 1. Oprócz ujemnego sprzężenia napięciowego skojarzonego z dwoma sprzężeniami różniczkującymi oraz nieznacznego dodatniego sprzężenia prądowego, układ posiada silne ujemne sprzężenie prądowe z ograniczeniem (inaczej: z progiem zadziałania) dla ochrony obwodu głównego przed niedopuszczalnymi przeciążeniami prądowymi.

Charakterystyczne parametry układu niezbędne do przeliczeń statycznych i dynamicznych:

C_E = 14,4 V min/obr - stała siły elektromotorycznej silnika,

C_M = 0,975 C_E = 14 kGm/A - stała momentu silnika,

R = 28,5 milioma - całkowita oporność obwodu głównego Leonarda,

R_g = 8,2 milioma - oporność wewnętrzna prądnicy sterującej,

R_s = 20,3 milioma - oporność wewnętrzna silnika,

GD^2 = 1444000 kGm^2 - zastępczy moment zamachowy obciążonej maszyny

$T_B = \frac{GD^2 R}{375\, C_E\, C_M}$ = 0,55 sek - elektromechaniczna stała czasowa napędu,

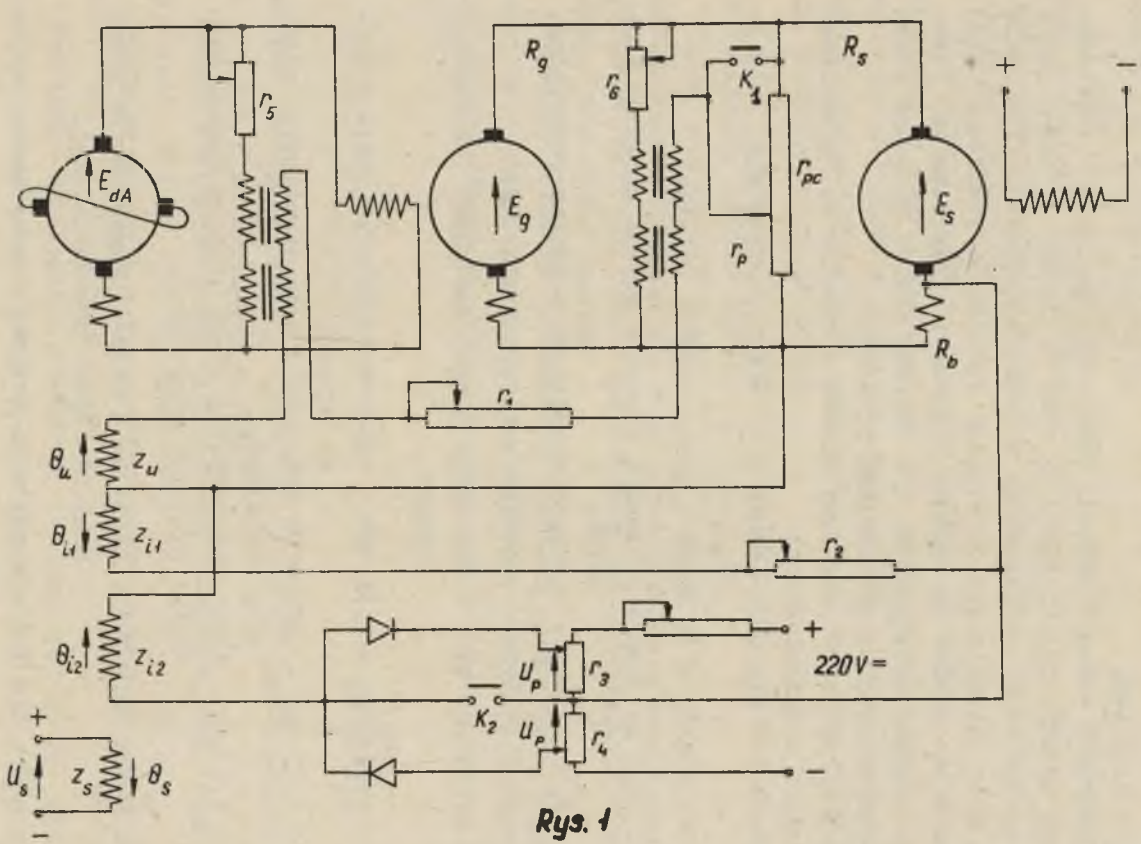
R_m = 5,26 oma - całkowita oporność obwodu wzbudzenia prądnicy sterującej,

T_m = 1,7 sek - elektromagnetyczna stała czasowa obwodu wzbudzenia prądnicy sterującej,

$K_g = \frac{E_{go}}{i_m}$ = 38,7 V/A - nachylenie krzywej magnesowania prądnicy na części prostoliniowej,

$k_A = \frac{E_{dA}}{\Theta_s}$ = 6,6 V/A - nachylenie krzywej magnesowania amplidyny,

T_q = 0,7 sek - stała czasowa obwodu poprzecznego (zwartego) amplidyny.



Rys. 1

Uproszczony schemat ideowy układu Leonarda maszyny wyciągowej 1100kW 45 obr/min.

Transformatory stabilizujące: $z_1 = z_2 = 1000$, oporności uzwojeń $r_{T1} = 6,7$ oma, $r_{T2} = 7,9$ oma, prądy znamionowe: $i_{1N}=3A$, $i_{2N} = 2$ A, indukcyjności od strumienia głównego $L_1 = L_2 = 6$ H.

Każdy transformator na schemacie 1 odpowiada dwom transformatorom połączonym szeregowo po stronie pierwotnej i wtórnej (łączna ilość transformatorów: 2+2 = 4).

Oporności zasilające i nastawcze (wartości maksymalne) w obwodach sprzężeń zwrotnych: $r_1 = 900$ omów, $r_2 = 3000$ omów, $r_3 = r_4 = 100$ omów, $r_5 = r_6 = 250$ omów, $r_{pc} = 1700$ omów, $r_p = 170$ omów.

$\alpha = \frac{r_p}{r_{pc}} = 0,1$ - współczynnik nastawienia potencjometru podczas normalnej pracy.

$R_b = 2,85.10^{-3}$ oma - oporność biegunów pomocniczych i kompensacji silnika.

Oznaczenia w powyższym zestawieniu są zgodne z oznaczeniami na schemacie 1.

3. SCHEMAT STRUKTURALNY UKŁADU

Wyjściowy wieloobwodowy schemat strukturalny układu sporządzony w oparciu o funkcje przejścia poszczególnych członów uwidoczniony jest na rys. 2. Przy sporządzaniu schematu zastosowano uproszczenia zaproponowane w [2], a w szczególności:

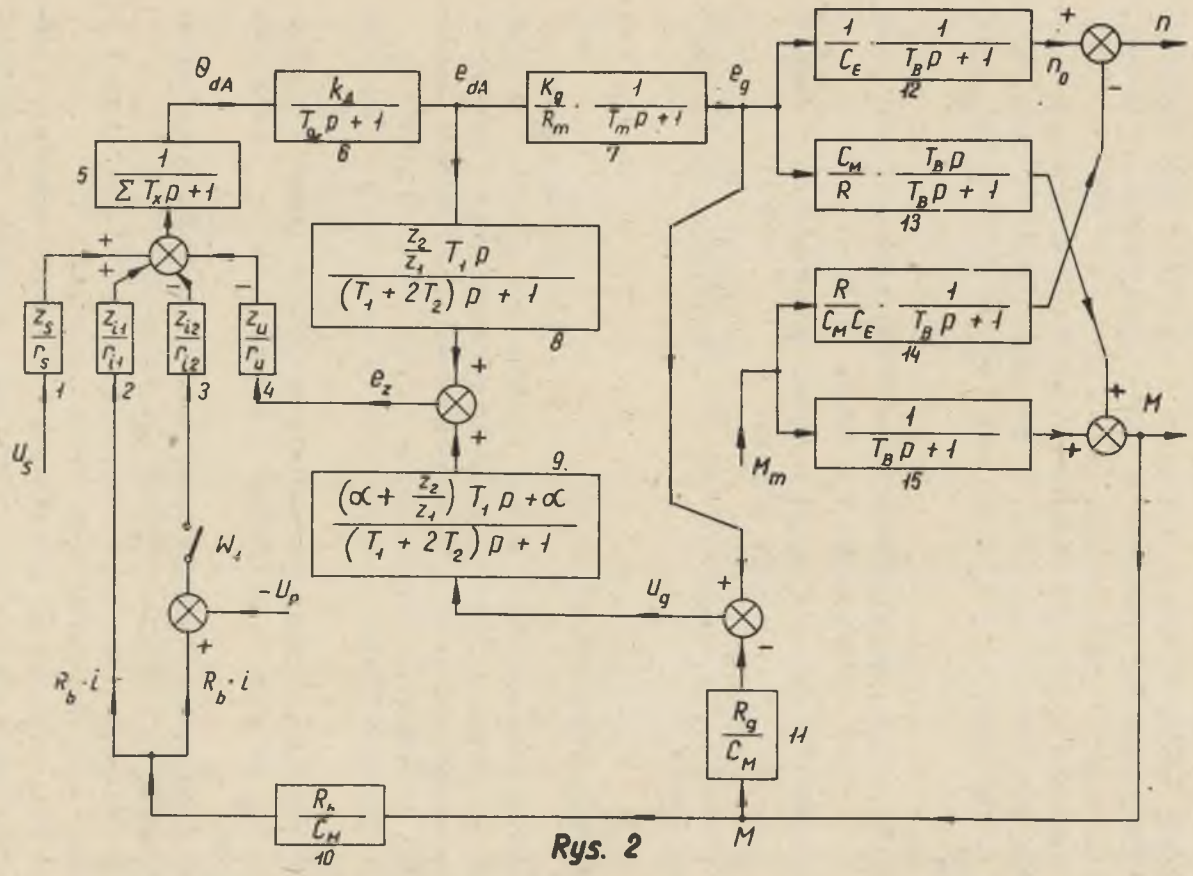
a) Założono liniowość wszystkich członów układu (porównaj p. 1).

b) Przyjęto idealną kompensację amplidyny, a więc założono $u_{dA} = e_{dA}$ na wejściu do jednego z transformatorów stabilizujących.

c) Pominięto wewnętrzne sprzężenie zwrotne amplidyny pomiędzy pierwszym i drugim stopniem wzmocnienia.

d) Pominięto strumienie rozproszenia uzwojeń sterujących amplidyny oraz transformatorów stabilizujących.

e) Nie uwzględniono wewnętrznego sprzężenia zwrotnego różniczkującego według drugiej pochodnej w układzie transformator stabilizujący - uzwojenie sterujące amplidyny" (porównaj [2]).



Rys. 2

Wieloobwodowy schemat strukturalny układu pokazanego na rys. 1.

f) Przyjęto równe stałe czasowe dla obwodów pierwotnych obu transformatorów stabilizujących, tzn. $T_{11} = T_{12} = T_1$ pomimo, że w rzeczywistym układzie oporność r_5 nie jest równa r_6. Dzięki temu przybliżeniu możliwe jest znaczne uproszczenie funkcji przejścia układu transformatorów stabilizujących połączonych szeregowo po stronie wtórnej z potencjometrem ujemnego sprzężenia napięciowego (szczegółowe wywody w [2]).

Poszczególne bloki schematu strukturalnego na rys.2 odpowiadają następującym elementom lub zespołom elementów układu rzeczywistego (rys. 1):

1,2,3,4 oraz 5 - pierwszemu stopniowi wzmocnienia amplidyny,

6 - drugiemu stopniowi wzmocnienia amplidyny,

7 - prądnicy sterującej,

8,9 - obwodowi ujemnego sprzężenia napięciowego skojarzonego z dwoma transformatorami stabilizującymi,

10,11 - opornikowi R_b w obwodzie głównym zasilającemu uzwojenia prądowych sprzężeń zwrotnych (jest to uzwojenie biegunów pomocniczych i kompensacji silnika),

12,13,14,15 - silnikowi prądu stałego, potraktowanemu jako element dwuwejściowy [2].

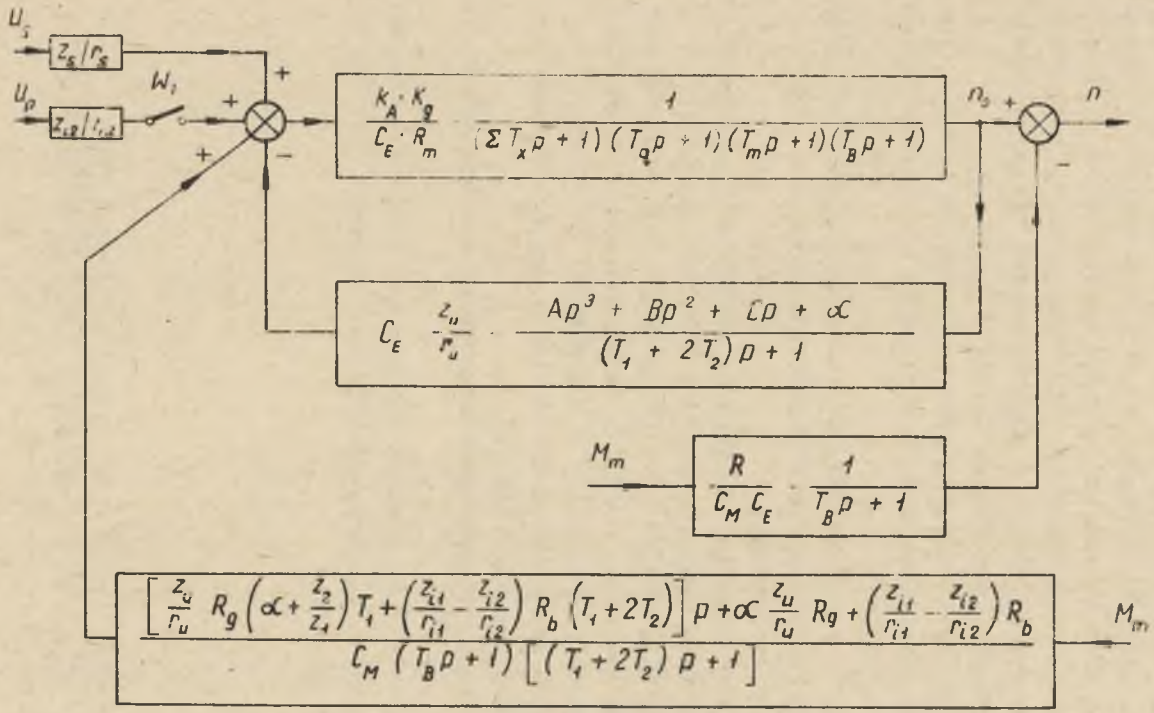
Schemat blokowy jednoobwodowy równoważny schematowi na rys. 2 pokazano na rys. 3a

Współczynniki A,B,C licznika funkcji przejścia w obwodzie ujemnego sprzężenia wzrotnego powyższego schematu wyrażają się następującymi wzorami:

$$A = \frac{R_m}{K_g}\frac{z_2}{z_1} T_1 T_m T_B$$

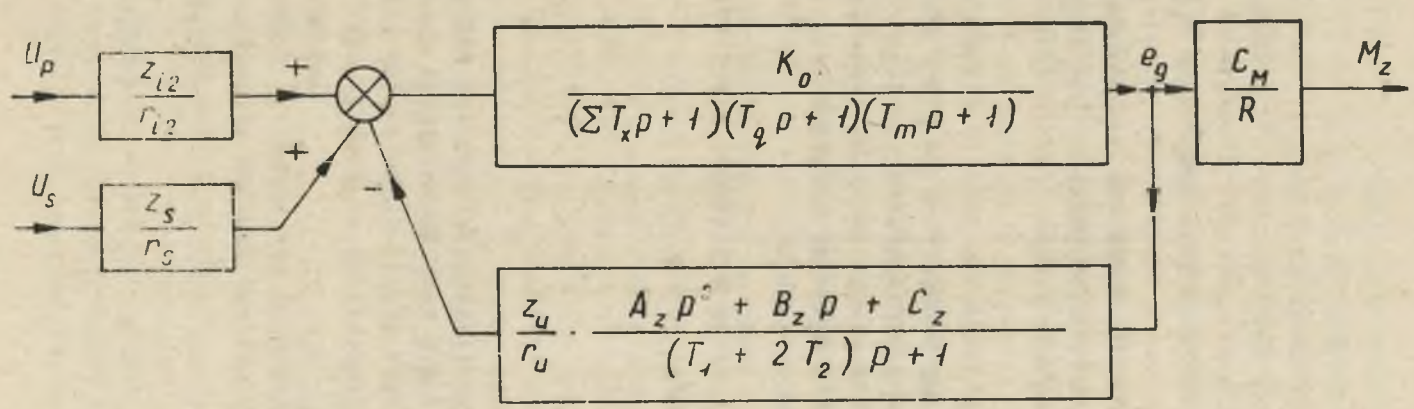
$$B = \left[\frac{R_m}{K_g}\frac{z_2}{z_1}\left(1 + \frac{T_m}{T_B}\right) + \frac{R_s}{R}\left(\alpha + \frac{z_2}{z_1}\right) - \left(\frac{z_{11}}{r_{11}} - \frac{z_{12}}{r_{12}}\right)\frac{r_u}{z_u}\frac{R_b}{R}\frac{T_T}{T_1}\right] T_1 T_B \tag{1}$$

$$C = \left[\alpha\frac{R_s}{R} + \frac{R_m}{K_g}\frac{z_2}{z_1}\frac{T_1}{T_B} + \left(\alpha + \frac{z_2}{z_1}\right)\frac{T_1}{T_B} - \left(\frac{z_{11}}{r_{11}} - \frac{z_{12}}{r_{12}}\right)\frac{r_u}{z_u}\frac{R_b}{R}\right] T_B$$



Rys. 3a

Jednoobwodowy schemat strukturalny równoważny schematowi wieloobwodowemu uwidocznionemu na rys. 2.



Rys. 3b

Schemat strukturalny układu pokazanego na rys. w przypadku maszyny zahamowanej.

Oznaczenia na schemacie 3a oraz we wzorach (1):

T_1, T_2 - stałe czasowe uzwojeń pierwotnych i wtórnych transformatorów stabilizujących,

$T_T = T_1 + 2T_2$ - zastępcza stała czasowa transformatorów stabilizujących,

z_1, z_2 - liczby zwojów uzwojeń transformatorów stabilizujących,

r_u, r_{i1}, r_{i2} - całkowite oporności obwodów sprzężeń zwrotnych, odpowiednio: napięciowego, prądowego dodatniego i prądowego ujemnego.

Pozostałe oznaczenia są identyczne z oznaczeniami zestawionymi w punkcie 2.

Schemat blokowy maszyny zahamowanej otrzymujemy przez podstawienie w funkcjach przejścia bloków silnika (rys. 2) wartości granicznej $T_B = \infty$. W wyniku tego podstawienia funkcje przejścia bloków 12, 14 i 15 stają się równe zeru, a funkcja przejścia bloku 13 przybiera wartość $\frac{C_M}{R}$.

Po przekształceniach dochodzimy do schematu jednoobwodowego pokazanego na rys. 3b.

Współczynniki A_z, B_z, C_z funkcji przejścia członu ujemnego sprzężenia wzrotnego na schemacie 3b wynoszą:

$$A_z = \frac{R_m}{K_g}\frac{z_2}{z_1} T_1 T_m$$

$$B_z = \left[\frac{R_m}{K_g}\frac{z_2}{z_1} + \frac{R_s}{R}\left(\alpha + \frac{z_2}{z_1}\right) - \left(\frac{z_{i1}}{r_{i1}} - \frac{z_{i2}}{r_{i2}}\right)\frac{r_u}{z_u}\frac{R_b}{R}\frac{T_T}{T_1}\right]T_1 \qquad (2)$$

$$C_z = \left[\alpha\frac{R_s}{R} - \left(\frac{z_{i1}}{r_{i1}} - \frac{z_{i2}}{r_{i2}}\right)\frac{r_u}{z_u}\frac{R_b}{R}\right]$$

4. KRYTERIA DLA DOBORU PARAMETRÓW OBWODÓW SPRZĘŻEŃ ZWROTNYCH

Uwagi ogólne. O wyborze parametrów sprzężeń zwrotnych mogą w ogólności decydować rozmaite kryteria uzależnione od wymagań ruchowych, warunków pracy oraz właściwości dynamicznych napędu.

Na przykład w układach Leonarda do napędu walcarek nawrotnych sprzężenia zwrotne obliczamy wychodząc z zadanej wartości współczynnika forsowania pola generatora zapewniającej wymaganą wzrotność układu. W bardzo dużych napędach, w których stosunek stałych czasowych $T_m : T_B$ osiąga wartość 100 do 150 przyjmuje się początkową wartość współczynnika forsowania rzędu 10 do 15.

W przypadku napędów maszyn wyciągowych obie stałe T_m i T_B są tego samego rzędu (w analizowanym napędzie $T_m = 1,7$ s, $T_B = 0,55$ s - patrz p. 2). Wynika to ze sprzęgnięcia silnia z dużymi masami rozłożonymi na średnicy koła pędnego.

Niezależnie od powyższego napęd rusza pod obciążeniem, a z uwagi na poślizg liny przyspieszenia nie mogą przekroczyć wartości krytycznych. Forsowanie wzbudzenia jest tu więc niecelowe, natomiast stosuje się układy do zwalniania lub ograniczania szybkości wzbudzania prądnicy (taką rolę spełniają krzywki ograniczające wychylenie steru lub np. specjalne układy z pojemnością dynamiczną).

W związku z tym, przy normalnym ruchu maszyny nie wymaga się dużych współczynników wzmocnienia w obwodach ujemnych sprzężeń zwrotnych.

Zasadniczym celem ujemnego sprzężenia napięciowego lub obrotowego jest uzyskanie odpowiednio sztywnej (płaskiej) charakterystyki statycznej zapewniającej dokładność sterowania, a między innymi utrzymanie w dopuszczalnych granicach różnicy między prędkością ustaloną przy jeździe do góry i w dół.

Zagadnienie to można rozwiązać kojarząc ujemne sprzężenie zwrotne (napięciowe lub obrotowe) z dodatnim sprzężeniem prądowym, które kompensuje częściowo spadek napięcia na oporności obwodu głównego.

To ostatnie sprzężenie (tworzące układ kompensacyjny) powinno być obliczone w ten sposób, by przy nieczynnych obwodach sprzężeń ujemnych nie powodować samowzbudzania się układu. Warunek ten podyktowany jest wymogami bezpieczeństwa pracy maszyny przy(bardzo małych prędkościach lub w stanie zahamowanym amperozwoje od sprzężeń ujemnych maleją tak, że zbyt silne dodatnie sprzężenie prądowe może wywołać samowzbudzenie prądnicy).

Drugim istotnym zagadnieniem, które trzeba będzie uwzględnić przy obliczaniu obwodów sprzężeń zwrotnych jest ograniczenie prądu remamentu podczas postoju silnika. Ujemne sprzężenie obrotowe jest wtedy nieczynne, natomiast ujemne sprzężenie napięciowe i dodatnie prądowe, które współdziałały przy usztywnieniu charakterystyki mechanicznej, kompensują się częściowo.

W związku z tym ograniczenie prądu remanentu przy pomocy sprzężeń zwrotnych, dobranych poprawnie z punktu widzenia sztywności charakterystyki i dokładności sterowania, może być w ogólności niewystarczające.

Należy więc brać pod uwagę konieczność zmiany współczynników wzmocnienia w obwodach poszczególnych sprzężeń. W analizowanym układzie mamy między innymi następujące możliwości:

a) powiększenie współczynnika ujemnego sprzężenia napięciowego, (styk K_1 na rys. 1) przy ewentualnym przerwaniu obwodu dodatniego sprzężenia prądowego,

b) usunięcie progu zadziałania ujemnego sprzężenia prądowego poprzez zwarcie prostowników blokujących (styk K_2 na rys. 1).

M' 'iwe jest oczywiście dowolne kojarzenie sposobu a) i b).

Przy powiększaniu współczynników wzmocnienia w obwodach ujemnych sprzężeń zwrotnych zmniejszamy zapas stabilności układu, która może stanowić czynnik ograniczający stopień obniżenia prądu remanentu (w przeciwieństwie do prostego układu Leonarda, który jest w stanie zahamowanym - pominąwszy samowzbudzenie od sprzężeń dodatnich - strukturalnie stabilny i zastosowane ujemne sprzężenia napięciowe lub prądowe mogą być dowolnie "silne").

Dodatkowym kryterium przy obliczaniu parametrów sprzężeń wzrotnych jest warunek nieprzeciążania cieplnego uzwojeń steru'..ych amplidyny. Podczas pracy układu uwzojenia te pracują przy zmiennym obciążeniu i dla każdego z nich można ustalić pewne obciążenie zastępcze. Postój maszyny może trwać kilka godzin przy wirującej przetwornicy i zespołach wzbudnic, dlatego też obciążenia prądowe uzwojeń sterujących, czynnych podczas postoju, należy traktować jako stałe.

Ujęcie ilościowe powyższych kryteriów można przedstawić w następujący sposób.

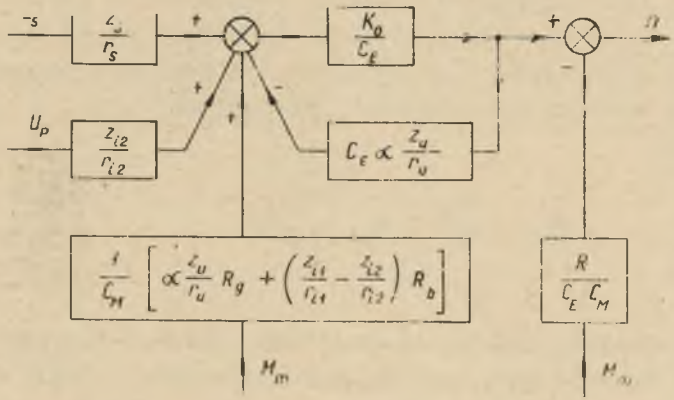
Charakterystyki statyczne. Ilościowe uzależnienie charakterystyki statycznej od parametrów sprzężeń zwrotnych można otrzymać w oparciu o schemat blokowy pokazany na rys. 3a. Podstawiając w wyrażeniach na funkcje przejścia poszczególnych członów tego schematu p = 0 otrzymujemy schemat dla stanu ustalonego pokazany na rys. 4. Po wykonaniu działań zgodnie ze strukturą schematu 4 dostajemy wzory na charakterystyki statyczne układu a mianowicie:

a) dla obciążeń nie przekraczających progu zadziałania ujemnego sprzężenia prądowego

$$n = \frac{1}{C_E}\left\{\frac{K_o U_s \frac{z_s}{r_s}}{1 + K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}} - \left[R - \frac{K_o\left(\alpha \frac{z_u}{r_u} R_g + \frac{z_{i1}}{r_{i1}} R_b\right)}{1 + K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}}\right] I\right\} \qquad (3)$$

We wzorze (3) K_o oznacza wypadkowe nachylenie charakterystyki magnesowania zespołu "amplidyna-prądnica sterująca", czyli

$$K_o = \frac{E_g}{\Theta_{dA}} = \frac{k_A K_g}{R_m} \quad \frac{V}{A} \qquad (4)$$



Rys.4. Schemat strukturalny układu z rys.1 dla stanu ustalonego

b) dla obciążeń przekraczających próg zadziałania ujemnego sprzężenia prądowego

$$n = \frac{1}{C_E}\left\{\frac{K_o \frac{z_s}{r_s} U_s}{1+K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}} - \right.$$

$$\left. - \left[R - K_o \frac{\left(\frac{U_p}{I} - R_b\right)\frac{z_{12}}{r_{12}} + \left(\alpha \frac{z_u}{r_u} R_g + \frac{z_{11}}{r_{11}} R_b\right)}{1 + K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}}\right] I\right\} \qquad (5)$$

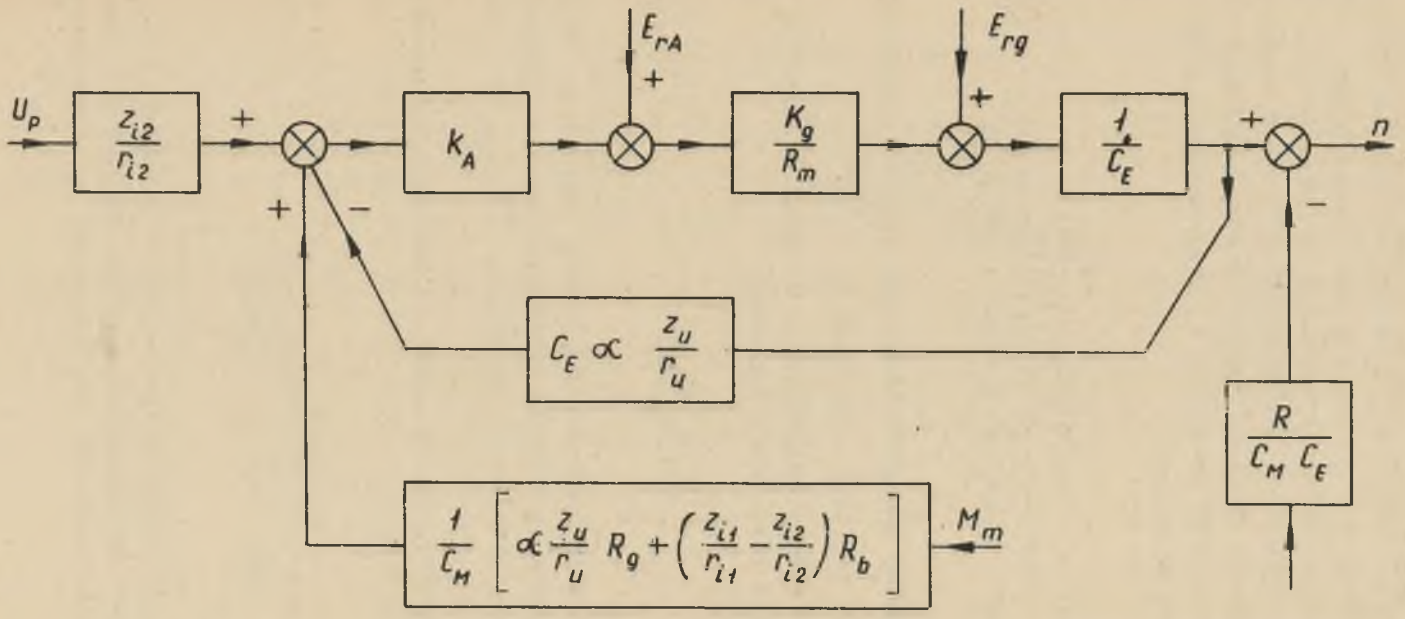
gdzie U_p jest napięciem porównawczym (patrz rys. 1), przy czym wzór (5) jest słuszny w założeniu $U_p \leqslant R_b I$.

<u>Obniżanie prądu remanentu.</u> Ilościowy wpływ sprzężeń zwrotnych na zmniejszenie prądu remanentu można określić wprowadzając do schematu blokowego, uwidocznionego na rys. 4, sygnały zaburzeniowe, odpowiadające napięciom remanentu amplidyny E_{rA} i prądnicy E_{rg}. W tym celu blok na schemacie 4, odpowiadający funkcji przejścia $\frac{K_o}{C_E}$ przedstawiamy w postaci szeregowo połączonych bloków o funkcjach przejścia k_A, $\frac{Z_g}{R_m}$ i $\frac{1}{C_E}$.

Odpowiedni schemat blokowy pokazano na rys. 5a. Założono przy tym, że wprowadzone napięcia remanentu są stałe (E_{rA} = = const, E_{rg} = const). Przenosząc na schemacie 5a węzły sumacyjne 2 i 3 do węzła 1 zastępujemy oba napięcia remanentu równoważnymi stałymi przepływami, działającymi w osi podłużnej amplidyny

$$\theta_{rA} = \frac{E_{rA}}{k_A}, \quad \theta_{rg} = \frac{E_{rg}}{K_o} \qquad (6)$$

Odpowiadający temu przekształceniu schemat blokowy uwidoczniony na rys. 5b jest analogiczny do schematu z rys. 4, a więc



Rys. 5a

Schemat strukturalny układu z rys. 1 (dla stanu ustalonego), uwzględniający napięcie remanentu amplidyny i prądnicy sterującej.

i wzór otrzymany dla charakterystyki statycznej będzie analogiczny do (5). Należy tylko zamiast napięcia sterującego U_s podstawić sumę przepływów remanentów według zależności (6).

Zakładając w tak uzyskanej charakterystyce n = 0 i rozwiązując otrzymane równanie względem momentu statycznego wypisujemy ogólne wyrażenie na prąd remanentu I_r zahamowanego układu z czynnymi sprzężeniami zwrotnymi:

$$I_r = \left(\frac{M_m}{C_M}\right)_{n=0} = \frac{K_o\left(\theta_{rA}+\theta_{rg}+U_p\frac{z_{12}}{r_{12}}\right)}{R+\alpha K_o\frac{z_u}{r_u}R_s+\left(\frac{z_{12}}{r_{12}}-\frac{z_{11}}{r_{11}}\right)K_o R_b} \tag{7}$$

Wzór (7) jest słuszny dla przypadku, gdy działa sprzężenie z ograniczeniem, tzn. gdy prąd remanentu $I_r > \frac{U_p}{R_b}$.

Jest to przypadek mało prawdopodobny. Z reguły w otwartym układzie Leonarda prąd remanentu, wynoszący

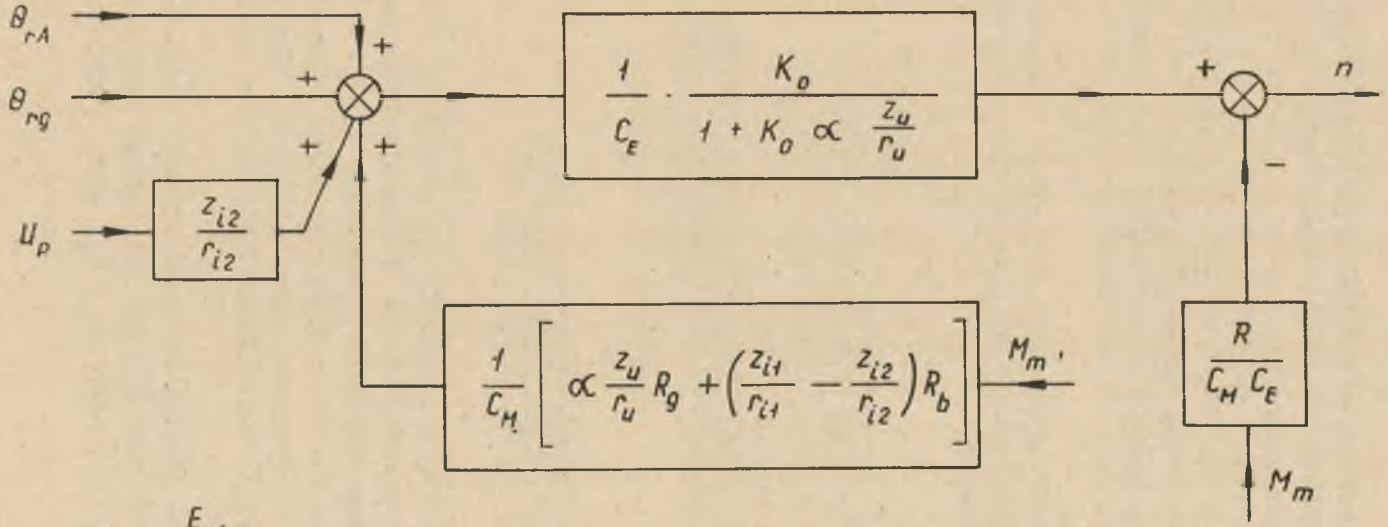
$$I_{ro} = \frac{K_o(\theta_{rA}+\theta_{rg})}{R} \tag{8}$$

nie przekracza prądu znamionowego. W układzie zamkniętym prąd $I_r < I_{ro}$, a więc ujemne sprzężenie ograniczające nie działa, co uwzględniamy przez podstawienie we wzorze (7) $z_{12} = 0$ oraz $U_p = 0$.

Dla normalnego układu połączeń, jaki ma miejsce przy pracy napędu otrzymujemy ostatecznie:

$$I_r = \frac{K_o(\theta_{rA}+\theta_{rg})}{R+K_o\left(\alpha\frac{z_u}{r_u}R_s-\frac{z_{11}}{r_{11}}R_b\right)} \tag{9}$$

Stosunek prądu I_r do prądu remanentu układu otwartego I_{ro} (wg wzoru 8) jest miarą skuteczności sprzężeń zwrotnych w odniesieniu do niszczenia remanentu magnetycznego w zahamowanym



$$\theta_{rA} = \frac{E_{rA}}{k_A}$$

$$\theta_{rg} = \frac{E_{rg}}{K_0}$$

Rys. 5b

Schemat strukturalny z rys. 5a po uproszczeniu.

układzie. Stosunek ten będziemy w dalszym ciągu nazywać współczynnikiem obniżania remanentu prądowego. Wynosi on:

a) dla normalnego układu połączeń

$$\left(\frac{I_r}{I_{ro}}\right)_1 = \frac{1}{1+K_o\left(\alpha\frac{z_u}{r_u}\frac{R_s}{R} - \frac{z_{i1}}{r_{i1}}\frac{R_b}{R}\right)} \tag{10}$$

b) przy przerwaniu obwodu dodatniego sprzężenia prądowego podczas postoju maszyny (sprzężenie to, jak widać z 10 przeszkadza w niszczeniu remanentu):

$$\left(\frac{I_r}{I_{ro}}\right)_2 = \frac{1}{1+K_o\alpha\frac{z_u}{r_u}\frac{R_s}{R}} \tag{11}$$

c) w przypadku zwarcia ("zmostkowania") układu prostowników w obwodzie ujemnego sprzężenia prądowego (zamknięcie styku K_2 na schemacie 1):

$$\left(\frac{I_r}{I_{ro}}\right)_3 = \frac{1}{1+K_o\left[\alpha\frac{z_u}{r_u}\frac{R_s}{R} + \left(\frac{z_{i2}}{r'_{i2}} - \frac{z_{i1}}{r_{i1}}\right)\frac{R_b}{R}\right]} \tag{12}$$

We wzorze (12) podstawiono r'_{i2} zamiast r_{i2} według (7) ponieważ oporność obwodu uległa zmianie na skutek wyeliminowania potencjometru wytwarzającego napięcie porównawcze U_p.

Współczynniki obniżania remanentu prądowego można odpowiednio dobierać poprzez zmianę oporności poszczególnych obwodów sprzężeń (α, r_u, r_{i1}, r_{i2}). Wzory ogólne (10) do (12) pozostają przy tym bez zmian.

Wzory (9) do (12) można również otrzymać wprost ze schematu dla stanu zwarcia (rys. 3b) wprowadzając jako sygnał wejściowy sumę przepływów $\theta_{rA} + \theta_{rg}$ (w miejsce $U_s + U_p$) oraz podstawiając $p = 0$.

Wykorzystanie cieplne uzwojeń sterujących. Nagrzewanie się uzwojeń sterujących amplidyny można kontrolować następującymi wzorami:

a) uzwojenie sterujące oraz uzwojenia ujemnych sprzężeń napięciowego i obrotowego są obciążone prądami, zmieniającymi się w przybliżeniu proporcjonalnie do prędkości maszyny. Prąd zastępczy będzie więc proporcjonalny do prędkości zastępczej, którą dla wykresu trapezowego obliczymy z wzoru:

$$v_z = v_N \sqrt{\frac{0{,}33(t_r + t_h) + t_u}{t_r + t_h + t_u + t_o}} \tag{13}$$

gdzie oznaczają:

v_N - ustaloną prędkość znamionową maszyny,

t_r, t_h, t_u, t_o - czasy: rozruchu, hamowania, jazdy ustalonej i przerwy.

Prądy zastępcze obciążające wymienione uzwojenia amplidyny obliczymy z zależności:

- dla uzwojenia sterującego

$$I_s = \frac{U_{sN}}{r_s} \cdot \frac{v_z}{v_N} \tag{14}$$

- dla uzwojenia sprzężenia napięciowego

$$I_u = \frac{\alpha U_{gN}}{r_u} \cdot \frac{v_z}{v_N} \tag{15}$$

- dla uzwojenia sprzężenia obrotowego

$$I_n = \frac{E_{TN}}{r_n} \cdot \frac{v_z}{v_N} \tag{16}$$

We wzorach (14) do (16) oznaczają

U_{sN}, U_{gN}, E_{TN} - napięcia odpowiadające prędkości znamionowej maszyny (uzwojenia zadającego amplidyny, twornika prądnicy i tachoprądnicy),

r_s, r_u, r_n - całkowite oporności obwodów sprzężeń zwrotnych.

b) obciążenie obwodu dodatniego sprzężenia prądowego jest proporcjonalne do prądu zastępczego I_z w obwodzie głównym. Wynika stąd wzór na prąd zastępczy (I_{i1}) uzwojenia sterującego:

$$I_{i1} = \frac{R_b \cdot I_z}{r_{i1}} \approx \frac{R_b \cdot I_N}{r_{i1}} \tag{17}$$

c) maksymalny prąd ujemnego sprzężenia prądowego z ograniczeniem wynosi:

$$I_{i2} = \frac{R_b \cdot I_{max} - U_p}{r_{i2}} \tag{18}$$

przy czym przez I_{max} oznaczono prąd pojawiający się w obwodzie głównym przy pełnym wychyleniu steru, nieodwzbudzonej prądnicy i zahamowanym silniku (teoretycznie przypadek taki może mieć miejsce, jeżeli nie zadziała system odwzbudzania),

d) w przypadku postoju maszyny obciążenia cieplne uzwojeń sterujących wynoszą:

- dla ujemnego sprzężenia napięciowego

$$I_u = \frac{\alpha R_s I_r}{r_u} \tag{19}$$

- dla uzwojenia dodatniego (lub ujemnego ciągłego) sprzężenia prądowego

$$I_i = \frac{R_b \cdot I_r}{r_i} \tag{20}$$

Stabilność. Na podstawie schematów strukturalnych uwidocznionych na rys. 3a i 3b możemy wypisać ogólne funkcje przejścia dla układu otwartego, przy pomocy których sporządzimy charakterystyki częstotliwościowe amplitudowo-fazowe celem oceny stabilności metodą Nyquista dla kilku charakterystycznych przypadków nastawienia sprzężeń zwrotnych.

Otrzymujemy:

a) dla stanu pracy:

$$W(p) = K \frac{Ap^3+Bp^2+Cp+\alpha}{(T_d p+1)(T_q p+1)(T_m p+1)(T_B p+1)(T_T p+1)} \tag{21}$$

b) dla maszyny zahamowanej

$$W_z(p) = K \frac{A_z p^2+B_z p+C_z}{(T_d p+1)(T_q p+1)(T_m p+1)(T_T p+1)} \tag{22}$$

We wzorach (21) i (22) oznaczają:

A, B, C oraz A_z, B_z, C_z - współczynniki obwodów sprzężeń zwrotnych odpowiednio wg wzorów (1) i (2),

T_d - sumę stałych czasowych uzwojeń sterujących amplidyny,

$K = \frac{k_A K_g}{R_m} \cdot \frac{z_u}{r_u}$ - częściowy współczynnik wzmocnienia układu otwartego.

Pozostałe oznaczenia podano w punkcie 2.

5. PRZYKŁADY PRZELICZEŃ SZCZEGÓŁOWYCH

Wyniki przeliczeń szczegółowych podano dla następujących przypadków nastawienia obwodów sprzężeń zwrotnych:

a) normalna praca maszyny przy nieczynnym odcięciu prądowym (dla obciążeń prądowych $I \leqslant 1{,}2\ I_N$).

b) praca maszyny przeciążonej przy czynnym odcięciu prądowym ($I > 1{,}2\ I_N$), przy czym oporność w obwodzie odcięcia do-

Tablica 1
(część 1)

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda maszyny wyciągowej 1100 kW, 45 obr./min
(jazda pod obciążeniem.)

L.p.	Stan układu (rodzaj pracy i połączenia)	Parametry obwodów sprzężeń zwrotnych	Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowo - fazowa
1.	Połączenie i nastawienie dla normalnej pracy. Odcięcie prądowe nie-czynne ($I < 1,2\ I_N$) Transf. stab. załączone.	$r_u = 737$ omów $r_{i1} = 3000$ omów $T_d = 0,25$ s $T_1 = 0,053$ s $T_2 = 0,02$ s $T_T = T_1 + 2T_2 \approx 0,1$ s	$Re\left[W(j\omega)\right] = 2,37\ \dfrac{-0,001\omega^8 + 0,02\omega^6 - 0,08\omega^4 + 0,093\omega^2 + 1}{0,00025\omega^{10} + 0,033\omega^8 + 0,64\omega^6 + 2,77\omega^4 + 3,76\omega^2 + 1}$ $Jm\left[W(j\omega)\right] = -2,37\ \dfrac{0,013\omega^7 + 0,12\omega^5 + 0,48\omega^3 + 2,39\omega}{0,00025\omega^{10} + 0,033\omega^8 + 0,64\omega^6 + 2,77\omega^4 + 3,76\omega^2 + 1}$
2.	Nastawienie jak w p.1, tylko przy wyłączonych transf. stabilizujących	$T_1 = T_2 = T_T = 0$ Pozostałe parametry jak w p. 1	$W(j\omega) = 2,37\ \dfrac{(-0,17\omega^4 - 2,44\omega^2 + 1) + j(0,042\omega^5 + 0,44\omega^3 + 2,94\omega)}{0,027\omega^8 + 0,57\omega^6 + 2,76\omega^4 + 3,70\omega^2 + 1}$
3.	Nastawienie jak w p. 1 przy czynnym odcięciu prądowym ($I > 1,2\ I_N$) Transf. stab. czynne.	$r_{i2} = 100$ omów Pozostałe parametry jak w p. 1	$Re\left[W(j\omega)\right] = 2,37\ \dfrac{-0,001\omega^8 - 0,04\omega^6 - 5,15\omega^4 + 12,04\omega^2 + 1}{0,00025\omega^{10} + 0,033\omega^8 + 0,64\omega^6 + 2,77\omega^4 + 3,76\omega^2 + 1}$ $Jm\left[W(j\omega)\right] = -2,37\ \dfrac{0,0066\omega^7 - 0,38\omega^5 + 13,65\omega^3 - 1,68\omega}{0,00025\omega^{10} + 0,033\omega^8 + 0,64\omega^6 + 2,77\omega^4 + 3,76\omega^2 + 1}$
4.	Nastawienie jak w p. 1 przy czynnym odcięciu ($I > 1,2\ I_N$) i wyłączonych transf. stab.	$r_{i2} = 100$ omów $T_1 = T_2 = T_T = 0$ Pozostałe parametry jak w p. 1	$W(j\omega) = 2,37\ \dfrac{(-5,38\omega^4 + 10,56\omega^2 + 1) + j(0,71\omega^5 - 12,82\omega^3 + 1,12\omega)}{0,027\omega^8 + 0,57\omega^6 + 2,76\omega^4 + 3,70\omega^2 + 1}$

Tablica 1

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda maszyny wyciągowej 1100 kW, 45 obr./min. (część 2)
(postój, silnik zahamowany).

L.p.	Stan układu (rodzaj pracy i połączenia)	Parametry obwodów sprzężeń zwrotnych	Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowo - fazowa.
5.	Maszyna zahamowana Ujemne sprzężenie napięciowe powiększone 10 razy (K_1 - zamkn.) Transf. stab. załączone.	$\alpha = 1$ $r_u = 567$ omów $r_{i1} = 3000$ omów $T_d = 0,25$ sek $T_T = 0,1$ sek	$W(j\omega) = 21,4 \dfrac{(-0,0005\,\omega^8 + 0,11\,\omega^4 - 1,75\,\omega^2 + 1) + j(-0,0048\,\omega^5 + 0,287\,\omega^3 - 2,63\,\omega)}{0,0009\,\omega^8 + 0,104\,\omega^6 + 1,68\,\omega^4 + 3,46\,\omega^2 + 1}$
6.	Jak w p. 5, tylko transformatory stabilizujące odłączone	Jak w p. 5 tylko $T_T = 0$	$W(j\omega) = 21,4 \dfrac{(-1,79\,\omega^2 + 1) + j(0,298\,\omega^3 - 2,65\,\omega)}{0,089\,\omega^6 + 1,63\,\omega^4 + 3,44\,\omega^2 + 1}$
7.	Maszyna zahamowana Zwarcie prostowników odcięcia prądowego (K_2 - zamkn.). Transf. stabilizujące czynne.	$\alpha = 0,1$ $r_u = 136$ omów $r_H = 3000$ omów $r_{i2} = 17,4$ omów $T_d = 0,5$ sek $T_T = 0,1$ sek	$W(j\omega) = 102 \dfrac{(-0,00017\,\omega^6 - 0,0246\,\omega^4 - 2,35\,\omega^2 + 1) + j(0,0042\,\omega^5 + 0,547\,\omega^3 - 2,89\,\omega)}{0,00355\,\omega^8 + 0,375\,\omega^6 + 2,30\,\omega^4 + 3,64\,\omega^2 + 1}$
8.	Jak w p. 7, tylko transformatory stabilizujące odłączone.	Jak w p. 7 tylko $T_T = 0$	$W(j\omega) = 102 \dfrac{(-2,39\,\omega^2 + 1) + j(0,596\,\omega^3 - 2,90\,\omega)}{0,355\,\omega^6 + 2,26\,\omega^4 + 3,64\,\omega^2 + 1}$

Tablica 2

Właściwości statyczne i dynamiczne układu Leonarda 1100 kW, 45 obr / min przy różnych nastawieniach parametrów sprzężeń zwrotnych.

Stan układu	Charakt. stat. przy znam wzbudz. dla $I < 1,2\ I_N$	Charakt. stat. przy znam wzbudz. dla $I > 1,2\ I_N$	$n_{N\,min}$ przy zachow. 2-krotnej przeciąż.		Współcz. obniżenia prądu remanentu	Maks. prądy uzw. ster. w % wart. znam.	Stabilność	
							Stan pracy	Maszyna zahamow.
L.p. x)	obr / min	obr / min	obr/min	%	I_r / I_{ro}	%	—	—
1	$n = 45 - 1,24 \cdot 10^{-3} I$	$n = 68,4 - 11,5 \cdot 10^{-3} I$	2,36	5,2	0,475	$I_s = 100$ $I_u = 98$ $I_{i1} = 2,4$ $I_{i2} = 189$ xx)	Układ stabilny	—
2	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	Układ stabilny	—
3	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	Układ stabilny	—
4	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	Układ stabilny	—
xxx) 5	$(n = 45 - 1,39\ 10^{-3} I)$	$(n = 47,5 - 3,06 \cdot 10^{-3} I)$	(2,64)	(5,9)	0,0447	$I_s = 0$ $I_u = 2,7$ (1270) $I_{i1} \approx 0$ $I_{i2} = 0$	—	Ukł. stab. (b. mały zapas)
6	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	—	Układ niestabilny
7	—	—	—	—	0,0097	$I_s = 0$, $I_{i1} \approx 0$ $I_u \approx 0$, $I_{i2} \approx 2,6$	—	Układ niestabilny
8	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	j.w.	—	Układ niestabilny

Uwagi: x) Numeracja stanów układu zgodna z numeracją w tablicy 1

xx) Przy prądzie zwarcia : $I_{z\,max} = 5940$ A .

xxx) W nawiasach podano wartości parametrów przy nastawieniu $\alpha = 1$ podczas pracy.

brano tak, że maksymalny prąd zwarcia układu przy znamionowym wzbudzeniu wynosi $I_{z\ max} = 5940$ A.

c) maszyna zahamowana przy równoczesnym powiększeniu wzmocnienia w obwodzie ujemnego sprzężenia napięciowego w celu obniżenia prądu remanentu (zwarcie styku K_1 na schemacie 1,czyli zwiększenie wartości α od 0,1 do 1).

d) maszyna zahamowana przy zwarciu prostowników odcięcia prądowego również w celu obniżenia prądu remanentu (zamknięcie styku K_2 na schemacie 1).

Dwa ostatnie stany rozpatrzono przede wszystkim z uwagi na łatwą konfrontację przeliczeń z doświadczeniem (próby zwierania styków K_1 i K_2 były wykonywane przez konstruktorów podczas prac rozruchowych).

Dla każdego ze stanów a,b,c,d wykreślono po dwie charakterystyki Nyquista (wg ogólnych wzorów 21 i 22), a mianowicie dla przypadku załączonych i wyłączonych transformatorów stabilizacyjnych, co umożliwia ocenę wpływu tych transformatorów na zapas stabilności.

Nastawione parametry obwodów sprzężeń zwrotnych oraz szczegółowe wzory charakterystyk częstotliwościowych zestawiono na tablicy 1.

Przebiegi charakterystyk uwidoczniono na rysunkach 6,7, 8a, 8b,9a i 9b.

W tablicy 2 zestawiono parametry charakteryzujące układ pod względem statycznym i dynamicznym dla wymienionych stanów pracy.

6. WNIOSKI

Na podstawie rozważań ogólnych zawartych w punkcie 4, jak również przeliczeń szczegółowych, ilustrujących właściwości statyczne i dynamiczne układu w wybranych charakterystycznych stanach pracy można sformułować kilka praktycznych wniosków i wskazań odnoszących się do

a) konfrontacji uproszczonych przeliczeń dynamicznych z niektórymi wynikami przeprowadzonych prób,

b) uwag o projektowaniu i nastawianiu obwodów sprzężeń zwrotnych w układach analogicznych do rozpatrywanego.

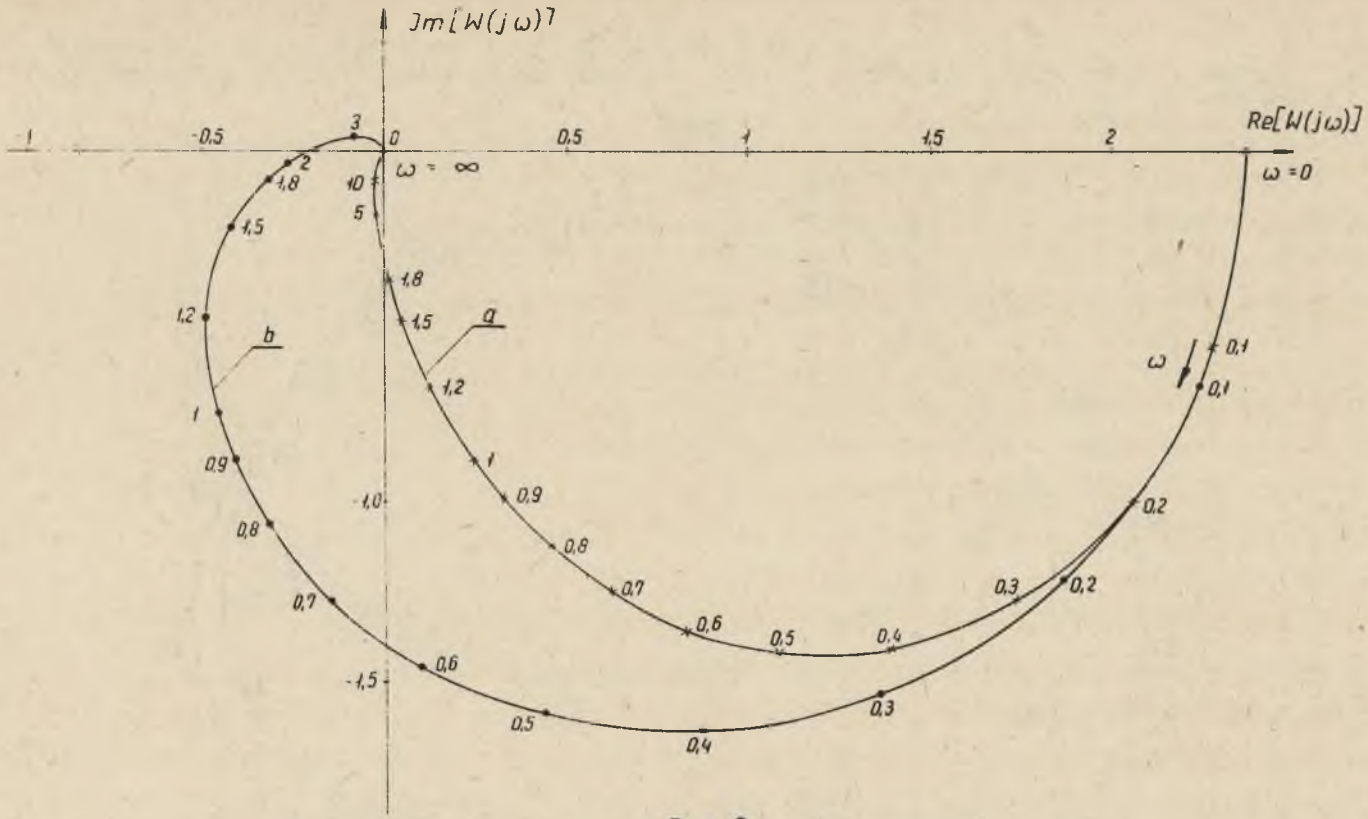
Do punktu a) Zestawienie wyników niektórych prób dynamicznych z obliczonymi przebiegami charakterystyk częstotliwości (rys. 6 do 9) pozwala wnioskować, że uproszczona analiza liniowa stosunkowo wiernie odtwarza zachowanie się układu w stanach nieustalonych, a w szczególności daje możliwość prawidłowej oceny stabilności. Do najbardziej cennych prób potwierdzających powyższy wniosek należy zaliczyć próby obniżania prądu remanentu przez zwieranie styków K_1 i K_2 (patrz schemat na rys. 1). Obie próby przeprowadzono przy czynnych transformatorach stabilizacyjnych.

W pierwszym przypadku (zamknięcie K_1) zahamowany układ okazał się stabilny pomimo 10-krotnego powiększenia współczynnika wzmocnienia w obwodzie ujemnego sprzężenia napięciowego.

Przebieg odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej (krzywa a na rys. 8a i 8b) wskazuje, że przy czynnych transformatorach stabilizacyjnych układ jest jeszcze stabilny, jednak zapas stabilności jest znikomy.

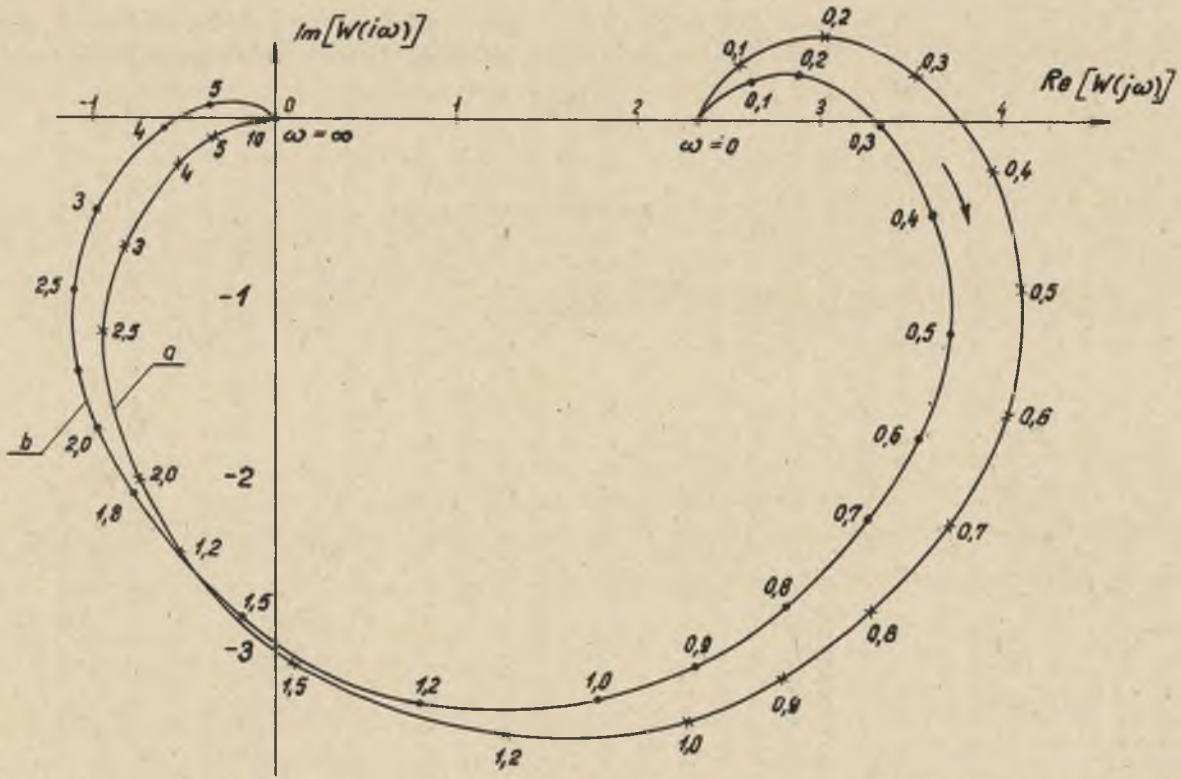
Ze względu na ryzyko kołysań nie wykonano analogicznej próby bez transformatorów stabilizacyjnych, co byłoby cennym sprawdzeniem wpływu tych transformatorów na stabilność według krzywej b na rys. 8a i 8b układ staje się niestabilny po wyłączeniu transformatorów).

W drugim przypadku (zamknięcie styku K_2) w zahamowanym układzie wystąpiły gwałtowne kołysania, co odpowiada przebiegom charakterystyk częstotliwościowych uwidocznionych na rys. 9a i 9b. Charakterystyki te wskazują za znaczny niedobór stabilności zarówno przy czynnych, jak i wyłączonych transformatorach stabilizacyjnych. Przyczyną tego jest 43-krotne (w stosunku do normalnej pracy) powiększenie współczynnika wzmocnienia układu otwartego na skutek zwarcia oporu potencjometru w obwodzie odcięcia prądowego (współczynniki wzmocnienia można porównać w oparciu o wzory w tablicy 1 cz. 1 i cz. 2).



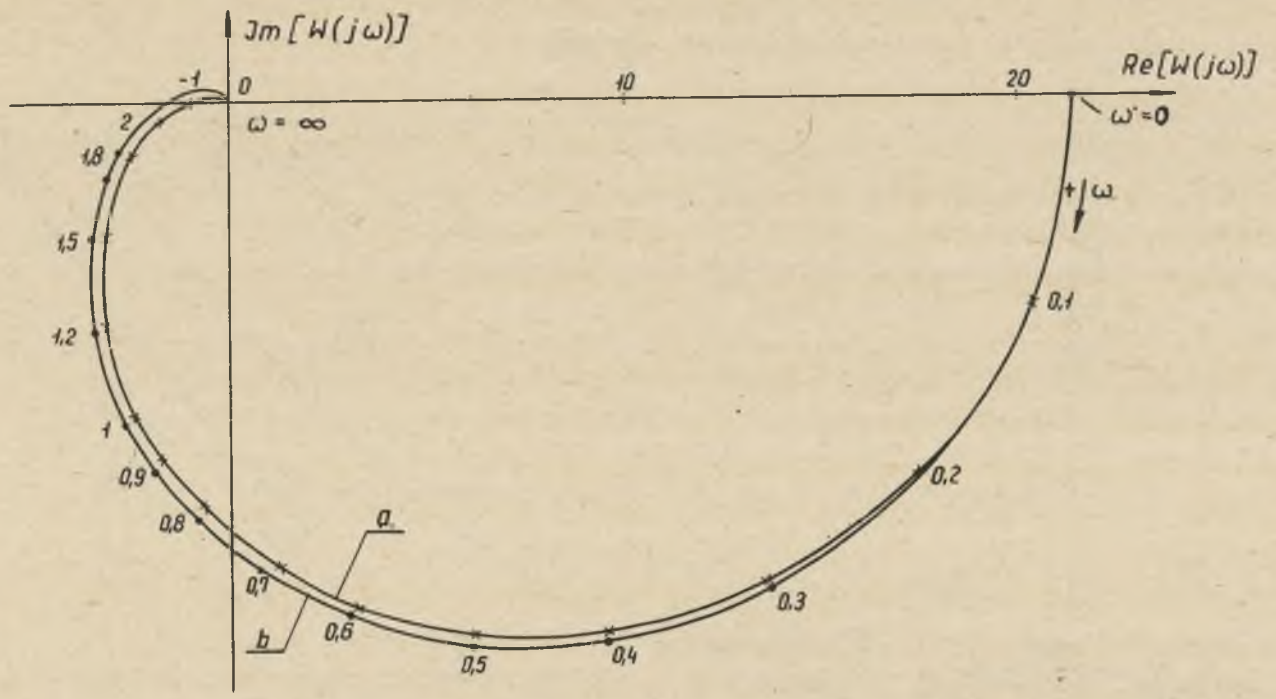
Rys. 6

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda 1100 kW, 45 obr/min., przy nieczynnym odcięciu prądowym ($I < 1{,}2\ I_N$). (a - z transf. stab., b - bez transf. stab.)



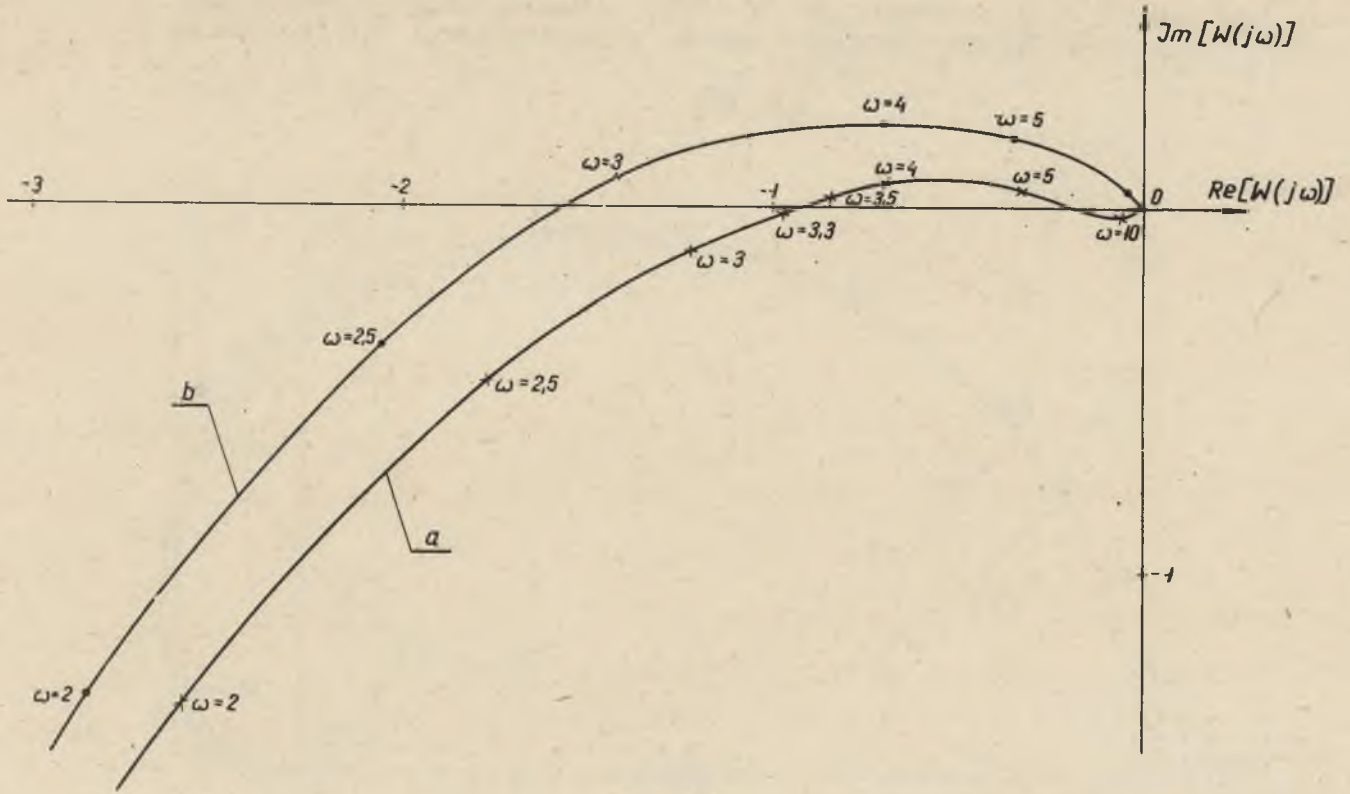
Rys. 7

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda 1100 kW, 45 obr./min, przy czynnym odcięciu prądowym (a - z transf. stab., b - bez transf. stab.).



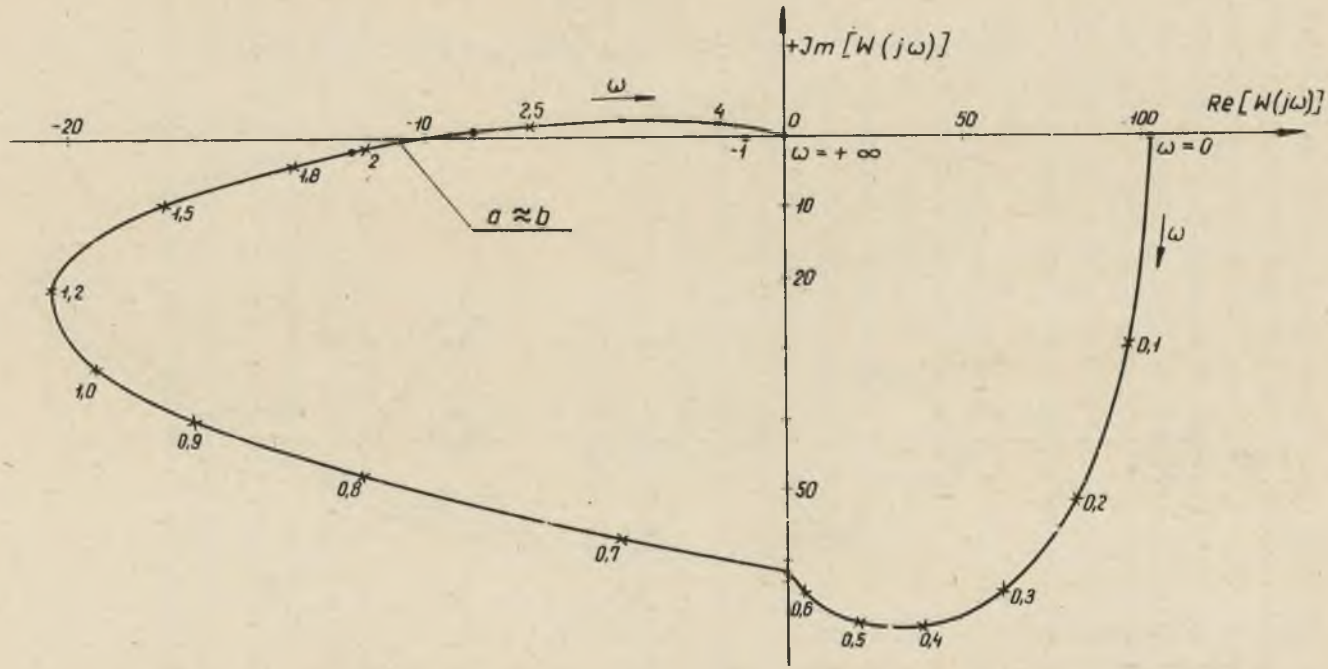
Rys. 8a

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda 1100 kW, 45 obr./min w stanie zahamowanym przy zwartym styku K_1 na schem. 1 (a - z transf. stab., b - bez transf. stab.).



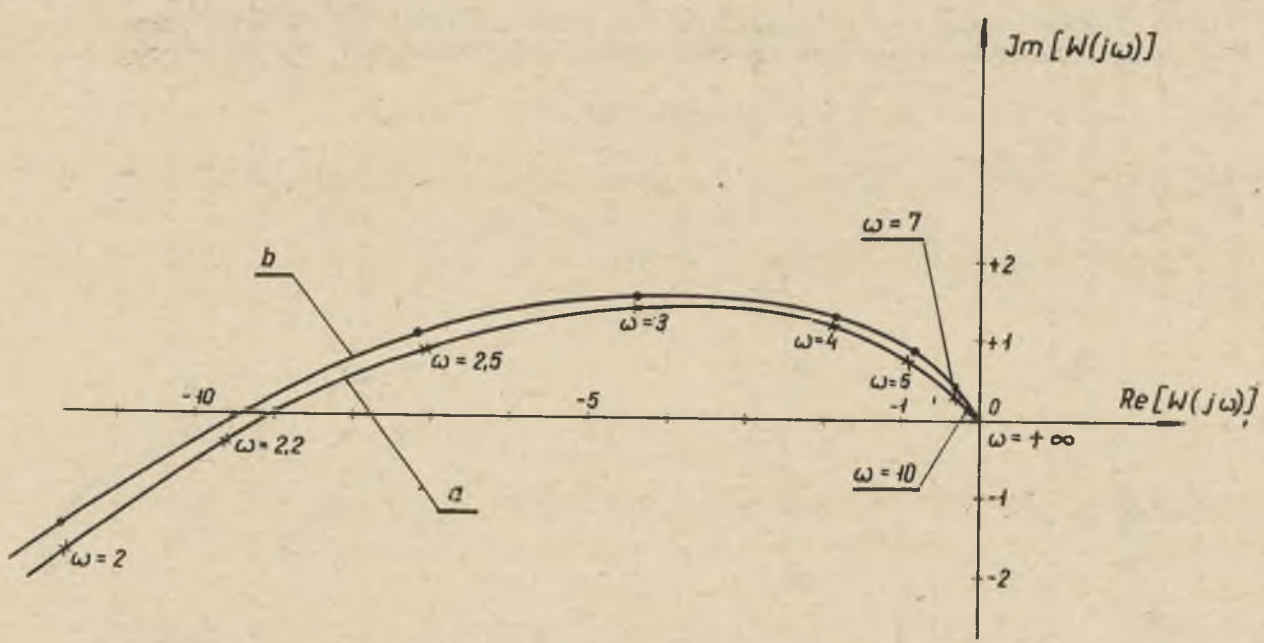
Rys. 8b

Fragmenty charakterystyk z rys. 8a w powiększeniu.



Rys. 9 a

Charakterystyki częstotliwościowe układu Leonarda 1100 kW, 45 obr/min w stanie zahamowanym przy zwartym styku K_2 na schem. 1 (a - z transf. stab., b - bez transf. stab.).



Rys. 9b

Fragmenty charakterystyk z rys. 9a w powiększeniu.

Stabilność układu przy zamkniętym styku K_1 ($\alpha = 1$) jest doświadczalnym potwierdzeniem dużego zapasu stabilności przy normalnym układzie połączeń ($\alpha = 0,1$), co równocześnie zgadza się z przebiegami charakterystyk uwidocznionych na rys. 6 i 7. Z przebiegów tych wynika, że stosowanie transformatorów stabilizacyjnych w normalnym układzie ($\alpha = 0,1$) nie jest konieczne.

Do punktu b) Skuteczność działania sprzężeń zwrotnych ciągłych należy sprawdzać dla trzech charakterystycznych stanów pracy układu:

- przy normalnym ciągnieniu,
- przy prędkościach dojazdowych,
- w stanie zahamowanym.

Dla zapewnienia dostatecznej sztywności charakterystyki statycznej przy normalnym ciągnieniu wystarczają stosunkowo nieduże współczynniki wzmocnienia w obwodach sprzężeń zwrotnych, Górnym ograniczeniem dla tych współczynników jest wykorzystanie cieplne uzwojeń sterujących napięciowych (uzwojenie zadające, ujemne sprzężenie napięciowe lub obrotowe) oraz samowzbudzenie się układu w przypadku dodatniego sprzężenia prądowego w odniesieniu do którego obowiązuje warunek (w myśl wzoru 3 przy $\frac{z_u}{r_u} = 0$):

$$\frac{z_{i1}}{r_{i1}} < \frac{R}{K_o R_b} \tag{23}$$

Należy przy tym podkreślić, że o ile ujemne sprzężenie napięciowe prowadzi zawsze do usztywnienia charakterystyki statycznej przy nieistnieniu dodatniego sprzężenia prądowego (tzn. przy $\frac{z_{i1}}{r_{i1}} = 0$ we wzorze 3), to przy wprowadzeniu do układu obu wymienionych sprzężeń, możemy mieć do czynienia bądź to z ich współdziałaniem, bądź też przeciwdziałaniem.

Współdziałanie obu sprzężeń ma miejsce w przypadku spełnienia nierówności (patrz wzór 3):

$$\frac{z_{i1}}{r_{i1}} K_o R_b < R_g \tag{24}$$

natomiast w przypadku nierówności odwrotnej, tzn.:

$$\frac{z_{i1}}{r_{i1}} K_o R_b > R_g \tag{25}$$

powiększenie wzmocnienia w obwodzie ujemnego sprzężenia napięciowego prowadzi do powiększenia spadku obrotów, a zatem oba sprzężenia przeciwdziałają sobie.

Warunki (24) i (25) stają się oczywiste po przekształceniu drugiego członu charakterystyki statycznej (wzór 3), a mianowicie

$$\Delta n = \frac{1}{C_{ES}} \left[R - \frac{K_o \left(\alpha \frac{z_u}{r_u} R_g + \frac{z_{i1}}{r_{i1}} R_b \right)}{1 + K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}} \right] I =$$

$$= \frac{1}{C_{ES}} \left[R_s - \frac{K_o \frac{z_{i1}}{r_{i1}} R_b - R_g}{1 + K_o \alpha \frac{z_u}{r_u}} \right] I \tag{26}$$

Ilustracją liczbową powyższych zależności stanowią charakterystyki statyczne (dla $I < 1{,}2\ I_N$) przytoczone w wierszach 1 i 5 tablicy 2.

Objaśnione sprzeczności należy brać pod uwagę przy doborze parametrów obu sprzężeń w celu usztywnienia charakterystyki statycznej układu w zakresach małych prędkości (np. przy dojazdach).

W stanie zahamowanym ujemne sprzężenie napięciowe jest jedynym sprzężeniem obniżającym prąd remanentu (w założeniu że na skutek odcięcia nie działa ujemne sprzężenie prądowe). Dodatnie sprzężenie prądowe działa w tym wypadku niekorzystnie (wzory 9, 10, 11), jednak wpływ ten jest pomijalny przy spełnieniu nierówności (23) i odpowiednio zwiększonym współczynniku wzmocnienia w obwodzie ujemnego sprzężenia napięciowego.

W stanie zahamowanym uzwojenia sterujące amplidyny są cieplnie niewykorzystane (patrz tablica 2), natomiast ograniczeniem dla współczynników wzmocnień w obwodach ujemnych sprzężeń jest stabilność układu.

Sprawdzanie stabilności analogicznych układów jest więc aktualne przede wszystkim w stanie zahamowanym przy obliczaniu ujemnych sprzężeń, niezbędnych do skutecznego tłumienia remanentu prądowego.

Dla tego przypadku pracy celowe jest stosowanie transformatorów stabilizujących w celu zwiększenia zapasu stabilności. Przy zwieraniu oporów dodatkowych w obwodach sprzężeń ujemnych mogą jednak powstać tak duże niedobory stabilności, że nie da się ich zlikwidować przy pomocy transformatorów stabilizujących (rys. 9a i b) załączonych według schematu 1.

Skuteczność działania tych transformatorów można by powiększyć np. przez wydzielenie osobnego obwodu dla sprzężenia różniczkującego i wprowadzenie do tego obwodu dodatkowego członu wzmacniającego.

Przeciążenia układu, powodujące zadziałanie odcięcia prądowego powodują również wyraźne pogorszenie stabilności układu (porównaj rys. 6 i 7), co łatwo wytłumaczyć na podstawie wzorów (1) i (2) z których wynika, że ujemne sprzężenie napięciowe i prądowe wpływają w analogiczny sposób na wartości współczynników A,B,C (lub A_z, B_z, C_z) w funkcjach przejścia układu otwartego. Fakt ten należy uwzględnić przy doborze parametrów obwodu odcięcia prądowego.

Rękopis złożono w redakcji w lutym 1964 r.

LITERATURA

[1] Sztwiertnia Wł.: Krajowy napęd elektrycznych maszyn wyciągowych o mocy powyżej 800 kW, dotychczasowe rozwiązania, doświadczenia, wnioski.
Maszyny wyciągowe - materiały i referaty na konferencję naukowo techniczną w ZUT "Zgoda" z udziałem Kat. Maszyn Górniczych Politechniki Śląskiej. Wydawnictwo SIMP, Świętochłowice, 8-10.X.1963 r.

[2] Gabryś W.: Uwagi o sporządzaniu schematów blokowych dla UAR. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej 1964, Elektryka Nr 17.

[3] Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. Warszawa, PWN 1963.

[4] Bühler H.: Einführung in die Theorie geregelter Gleichstromantriebe. Birkhäuser Verlag, Basel 1962.

АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ СИСТЕМЫ ЛЕОНАРДА С ЭЛЕКТРОМАШИННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИВОДЯЩЕЙ В ДВИЖЕНИЕ ШАХТНУЮ ПОДЪЕМНУЮ МАШИНУ

Р е з ю м е

Здесь указано влияние параметров обратных связей на статические и динамические свойства системы Леонарда с амплидином, приводящей в движение краевую подъемную машину 1100 квт 45 обор/мин. На основании приведенных общих формул, а также подробных расчетов, иллюстрирующих статические и динамические свойства системы, сформулировано практические выводы по вопросу сопоставления теоретического исследования стабильности с результатами произведенных опытов, а также приведено несколько указаний относительно проектирования и наладки обратных связей в аналогичных системах.

FEED - BACK CIRCUITS OF THE AMPLIDYNE CONTROL OF LEONARD'S SYSTEM OF DRIVING WINDING ENGINES

Summary

Analysis of the effect of the feed - back parameter on the static and dynamic properties of Leonard's System with the amplidyne driving the country winding engine 1100 kW, 45 r.p.m. According to the general formulas and also to the detailed calculation, illustrating the statical and dynamical properties of the system there were given the practical conclusions about the correlation of the theoretical investigation of the stability with experimental results. Some instructions about the planning and adjustement of the feed-backs in the analogical systems were given.