

Seria: AUTOMATYKA z. 7

FERDYNAND WAGNER
Katedra Automatyki
Procesów Przemysłowych

WŁAŚCIWOŚCI NAWROTNEGO UKŁADU LEONARDA
Z ODCIĘCIEM PRĄDOWYM I NAPIĘCIOWYM
ZE WZMACNIACZEM MAGNETYCZNYM

Streszczenie. W spotykanych w przemyśle układach napędowych Leonarda stosuje się powszechnie jako wzmacniacze amplidyny. Celem artykułu jest przeanalizowanie układu, w którym amplidynę zastąpiono wzmacniaczem magnetycznym przy równoczesnej modyfikacji obwodu sprzężenia zwrotnego, dzięki której uniknięto galwanicznego połączenia obwodu twornika z obwodem wzbudzenia.

Szczegółowa analiza statyczna i dynamiczna uzasadnia celowość zastąpienia amplidyny tańszym i pewniejszym w działaniu wzmacniaczem magnetycznym dla napędów o niezbyt dużych mocach (do około kilkudziesięciu kW).

1. Wstęp

Od nowoczesnych zautomatyzowanych układów Leonarda żądamy, aby ich charakterystyka mechaniczna była sztywna w zakresie obciążeń do pewnej wartości granicznej i aby po przekroczeniu tej wartości obciążenia opadała możliwie stromo w dół. Układy z tego rodzaju charakterystyką nie wymagają stosowania zabezpieczeń nadprądowych. Charakterystyka tego typu nosi nazwę charakterystyki "koparkowej". W zakresie dopuszczalnych obciążeń wymagania odnośnie sztywności charakterystyki mechanicznej mogą być więcej lub mniej ostre. Przy żądaniu dużej sztywności stosuje się w takim układzie sprzężenie zwrotne

prędkościowe uzyskane albo przy pomocy tachoprądnicy, albo przez równoczesne zastosowanie ujemnego sprzężenia napięciowego i dodatniego sprzężenia prądowego o odpowiednio dobranych parametrach.

W przemyśle mamy do czynienia z dużą ilością napędów, w których wymagania odnośnie sztywności charakterystyk w zakresie dopuszczalnych obciążeń nie są zbyt ostre (napędy zgniataczy, nożyc latających i wiele innych). W tych wszystkich przypadkach stosuje się układy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym napięciowym i ujemnym sprzężeniem zwrotnym prądowym z zastosowaniem tzw. odcięć, czyli automatycznym wyłączaniem działania danego sprzężenia zwrotnego w zakresie odpowiednich obciążeń. Rozważania zawarte w artykule dotyczą tego właśnie, bardzo w przemyśle rozpowszechnionego typu układów napędowych.

W pracy omówiono: rodzaje sprzężeń zwrotnych stosowanych w układzie Leonarda, porównanie dokładności regulacji prędkości silnika przy różnych rodzajach sprzężeń zwrotnych z punktu widzenia sztywności charakterystyki mechanicznej; zalety układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym napięciowym z odcięciem i prądowym z odcięciem; układ laboratoryjny zmontowany przez autora z przedstawieniem jego charakterystyk zdjętych doświadczalnie; przeanalizowano własności dynamiczne układu napędowego przez zamodelowanie go na maszynie analogowej. W wyniku przeprowadzonych rozważań wyciągnięto wnioski odnośnie możliwości wprowadzenia do omawianego układu napędowego wzmacniaczy magnetycznych zamiast powszechnie stosowanej amplidyndy.

2. Sprzężenia zwrotne z odcięciami stosowane w układzie Leonarda

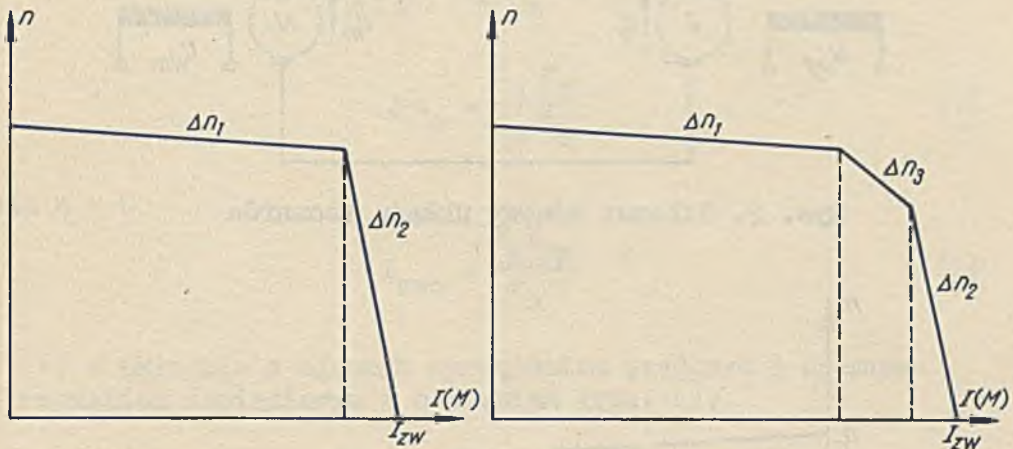
W układzie napędowym Leonarda narażonym na częste przeciążenia, w układzie, dla którego przeprowadza się częsty rozruch, hamowanie, względnie nawrót, sprawą istotną jest zabezpieczenie napędu przed nadmiernym przeciążeniem, które mogłoby doprowadzić do zniszczenia maszyn. Innymi słowy dążymy do uzyskania tzw. "koparkowej" charakterystyki mechanicznej. Charakterystykę taką można uzyskać stosując następujące kombinacje sprzężeń zwrotnych;

a) ujemne sprzężenie napięciowe z odcięciem (proporcjonalne do napięcia generatora) i ujemne sprzężenie prądowe (proporcjonalne do prądu obciążenia);

b) ujemne sprzężenie napięciowe (proporcjonalne do napięcia generatora) i ujemne sprzężenie prądowe z odcięciem (proporcjonalne do prądu obciążenia);

c) ujemne sprzężenie napięciowe z odcięciem (proporcjonalne do prądu wzbudzenia generatora) i ujemne sprzężenie prądowe z odcięciem (proporcjonalne do prądu obciążenia) w tzw. układzie Archangielskiego;

d) ujemne sprzężenie napięciowe z odcięciem (proporcjonalne do napięcia generatora) i ujemne sprzężenie prądowe z odcięciem (proporcjonalne do prądu obciążenia), czyli tzw. zmodyfikowany układ Archangielskiego.

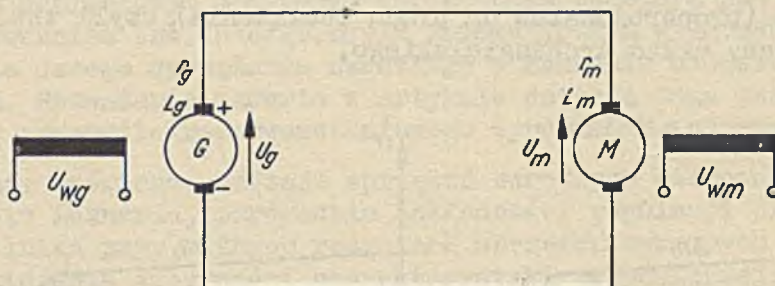


Rys. 1. Charakterystyki koparkowe układu Leonarda

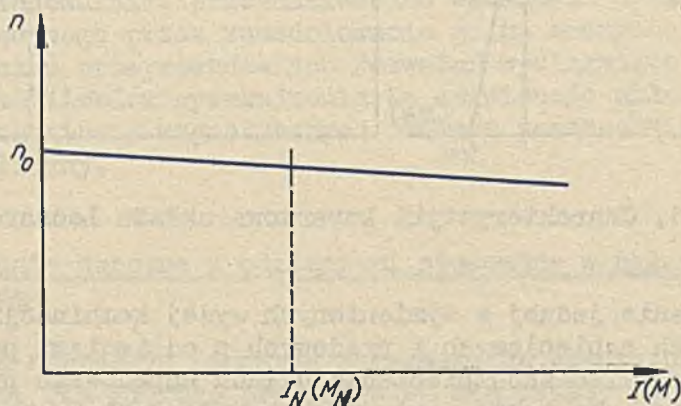
Zastosowanie jednej z wymienionych wyżej kombinacji sprzężeń zwrotnych napięciowych i prądowych z odcięciami pozwala osiągnąć nie tylko zabezpieczenie układu napędowego przed przeciążeniem, ale także usztywnia charakterystykę mechaniczną układu Leonarda (z wyjątkiem c).

3. Porównanie dokładności regulacji prędkości z punktu widzenia "sztywności" charakterystyk mechanicznych

Rozpatrzony jest układ Leonarda (rys. 2). Charakterystyka mechaniczna tego układu (rys. 3).



Rys. 2. Schemat ideowy układu Leonarda



Rys. 3. Charakterystyka mechaniczna układu Leonarda

a) spadek prędkości (bez układu regulacji):

$$\begin{cases} E_g = k U_{wg} \\ E_g = E_m + I_a r_a \\ E_m = c_m \Phi_m n_m \end{cases}$$

stąd

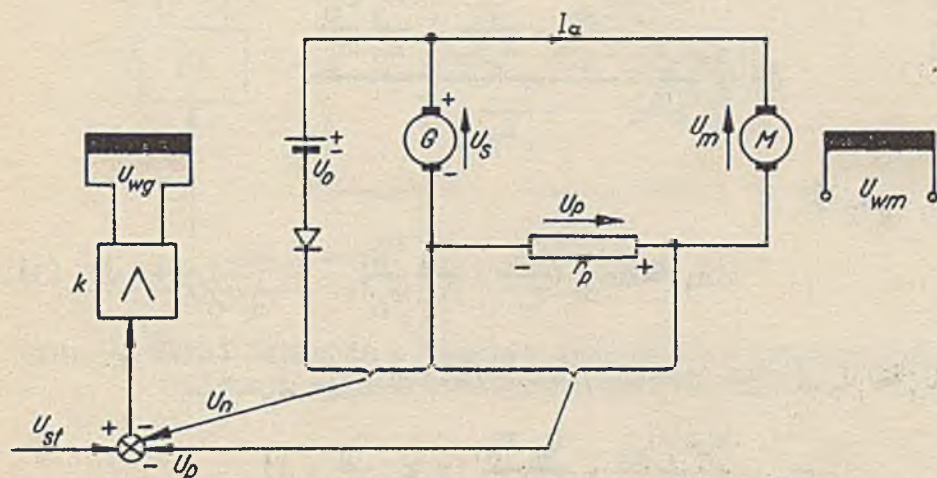
$$n_m = \frac{k U_{wg}}{c_m \Phi_m} - \frac{I_a r_a}{c_m \Phi_m} = n_0 - \Delta n_0$$

$$\Delta n_0 = \frac{I_a r_a}{c_m \Phi_m} \quad (1)$$

dla $n = 0$

$$I_{zwo} = \frac{k U_{wg}}{r_a} \quad (2)$$

b) w układzie z ujemnym sprzężeniem prądowym i ujemnym sprzężeniem napięciowym z odcięciem (rys. 4):



Rys. 4. Układ Leonarda z ujemnym sprzężeniem prądowym i ujemnym sprzężeniem napięciowym z odcięciem

$$\left\{ \begin{array}{l} E_g = k_g U_{wg} \\ E_g = c_m \dot{\Phi}_m n_m + I_a r_a \\ U_{wg} = k_1 U_{st} - k_2 U_n - k_3 U_p \\ U_p = I_a r_p \\ U_n = \begin{cases} 0 & \text{dla } U_g \leq U_0 \\ E_g - I_a r_a - U_0 & \text{dla } U_g > U_0 \end{cases} \end{array} \right.$$

stąd

$$\text{dla } U_g > U_0$$

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st} + k_g k_2 U_0}{C_m \dot{\Phi}_m (1 + k_g k_2)} - \frac{I_a r_a \left(k_g k_2 \frac{r_{am}}{r_a} + 1 + k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} \right)}{C_m \dot{\Phi}_m (1 + k_g k_2)}$$

czyli

$$\Delta n = \frac{I_a r_a \left(\frac{r_{am}}{r_a} + \frac{1}{k_g k_2} + \frac{k_3 r_p}{k_2 r_a} \right)}{C_m \dot{\Phi}_m \left(\frac{1}{k_g k_2} + 1 \right)}$$

jeśli $k_g k_2 \gg 1$

$$\Delta n_1 \cong \Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} + \frac{k_3 r_p}{k_2 r_a} \right) \quad (3)$$

dla $U_g \leq U_0$ (brak sprzężenia napięciowego)

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st}}{C_m \dot{\Phi}_m} - \frac{I_a r_a}{C_m \dot{\Phi}_m} \left(k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1 \right)$$

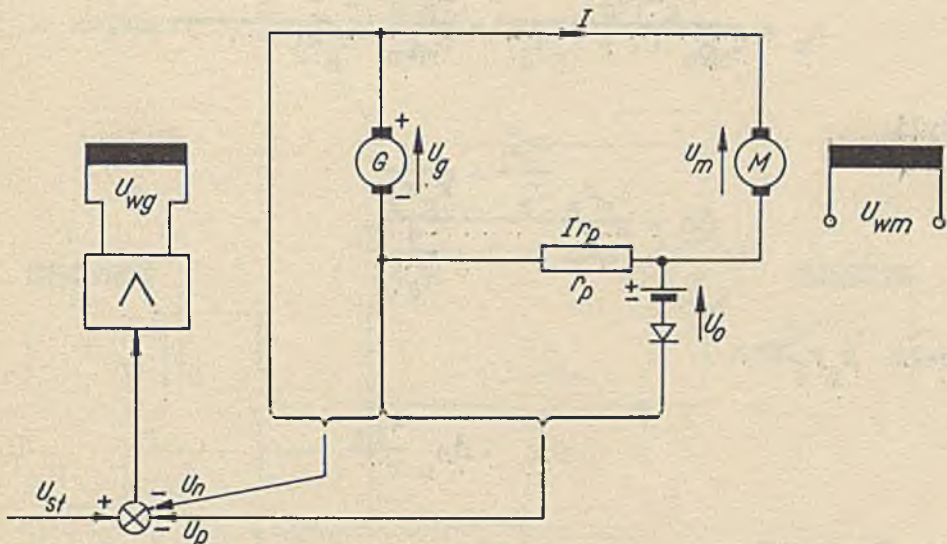
czyli

$$\Delta n_2 = \Delta n_o \left(k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1 \right) \quad (4)$$

Im większe wzmocnienie układu (większe współczynniki k_1 , k_2 , k_3), tym szybszy spadek obrotów aż do zatrzymania silnika przy prądzie I_{zw} :

$$I_{zw} = \frac{k_g k_1 U_{st}}{k_g k_3 r_p + r_a} = \frac{I_{zwo}}{1 + k_g k_3 \frac{r_p}{r_a}} \quad (5)$$

c) w układzie z ujemnym sprzężeniem napięciowym i ujemnym sprzężeniem prądowym z odcięciem (rys. 5):



Rys. 5. Układ Leonarda z ujemnym sprzężeniem napięciowym i ujemnym sprzężeniem prądowym z odcięciem

$$\left\{ \begin{array}{l} E_g = k_g U_{wg} \\ E_g = C_m \dot{\Phi}_m n_m + I_a r_a \\ U_{wg} = k_1 U_{st} - k_2 U_n - k_3 U_p \\ U_n = E_g - I_a r_{ag} \\ U_p = \begin{cases} 0 & \text{dla } I_a r_a \leq U_0 \\ I_a r_a - U_0 & \text{dla } I_a r_a > U_0 \end{cases} \end{array} \right.$$

stąd dla $I_a r_a \leq 0$ (brak sprzężenia prądowego)

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st}}{C_m \dot{\Phi}_m (1 + k_g k_2)} - \frac{I_a r_a}{C_m \dot{\Phi}_m} \frac{k_g k_2 \frac{r_{am}}{r_a} + 1}{k_g k_2 + 1}$$

czyli

$$\Delta n = \frac{I_a r_a}{C_m \dot{\Phi}_m} \frac{\frac{r_{am}}{r_a} + \frac{1}{k_g k_2}}{1 + \frac{1}{k_g k_2}}$$

jeśli $k_g k_2 \gg 1$

$$\Delta n_1 = \Delta n_0 \frac{r_{am}}{r_a} \quad (6)$$

dla $I_a r_a > U_0$

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st} + k_g k_3 U_0}{C_m \dot{\Phi}_m (1 + k_g k_2)} - \frac{I_a r_a}{C_m \dot{\Phi}_m} \frac{1 + k_g k_2 \frac{r_{am}}{r_a} + k_g k_3 \frac{r_p}{r_a}}{1 + k_g k_2}$$

czyli

$$\Delta n = \frac{I_a r_a}{c_m \Phi_m} \frac{1}{g k_2} + \frac{r_{am}}{r_a} + \frac{k_3 r_p}{k_2 r_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{g k_2}}$$

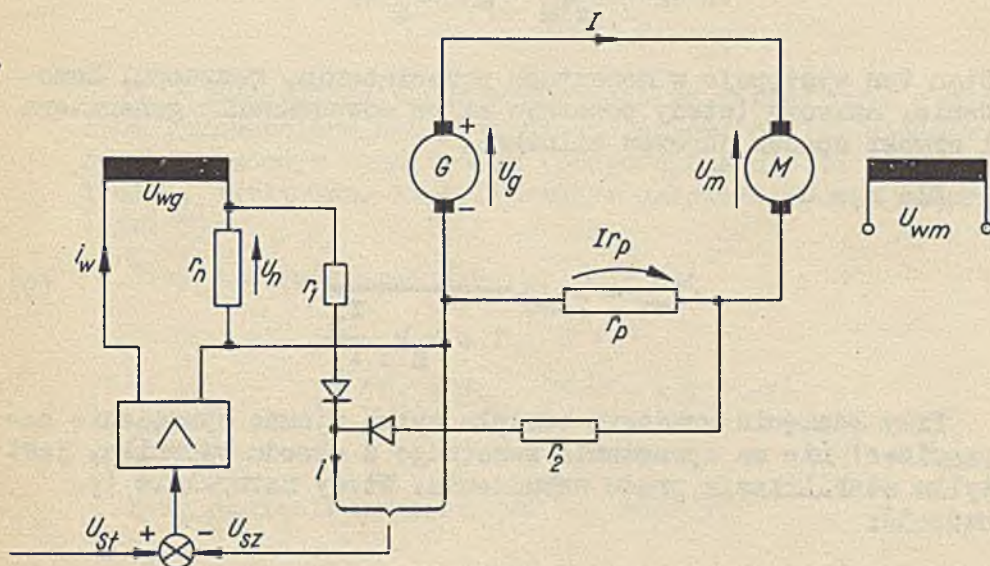
jeśli $g k_2 \gg 1$

$$\Delta n_2 = \Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} + \frac{k_3 r_p}{k_2 r_a} \right) \quad (7)$$

dla $n = 0$

$$I_{zw} = I_{zwo} \frac{1 + \frac{k_3}{k_1} U_0}{1 + k_3 \frac{r_p}{g r_a} + k_2 \frac{r_{am}}{g r_a}} \quad (8)$$

a) w układzie Archangielskiego (rys. 6):



Rys. 6. Układ Archangielskiego

gdy działa sprzężenie napięciowe:

$$i = \frac{i_w r_n}{r_n + r_1 + r_{wzm}} = f(i_w)$$

gdy działa sprzężenie prądowe:

$$i = \frac{I r_p}{r_p + r_2 + r_{wzm}} = f(I)$$

gdy działają sprzężenia napięciowe i prądowe:

$$i = \frac{i_w r_n r_2 + I r_p r_1}{r_1 r_2 + (r_1 + r_2) r_{wzm}} = f(i_w, I)$$

Przy odcięciu napięciowym (działa tylko ujemne sprzężenie prądowe):

$$\Delta n_2 = \frac{I r_a}{c \Phi_m} \left(k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1 \right)$$

Stan ten występuje w momentach przeciążenia, rozruchu, hamowania, nawrotu (wtedy powstaje silne odwzbudzenie generatora i szybki spadek obrotów silnika).

Dla $n = 0$

$$I_{zw} = I_{zwo} \frac{1}{1 + k_g k_3 \frac{r_p}{r_a}} \quad (9)$$

Przy odcięciu prądowym (działa tylko ujemne sprzężenie napięciowe) nie ma sprzężenia zwrotnego z obwodu twornika, jest tylko stabilizacja prądu wzbudzenia. Wtedy naturalnie (p. wzór 3):

$$\Delta n_1 = \frac{I r_a}{c \Phi_m} = \Delta n_0$$

Gdy działa sprzężenie prądowe i napięciowe:

$$\begin{cases} E_g = k_g U_{wg} \\ E_g = C_m \phi_m n_m + I_a r_a \\ U_{wg} = k_1 U_{st} - k_2 U_{wg} - k_3 U_p \\ U_p = I_a r_p \end{cases}$$

stąd

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st}}{C_m \phi_m (1+k_2)} - \frac{I_a r_a}{C_m \phi_m} \left(\frac{k_g k_3}{1+k_2} \frac{r_p}{r_a} + 1 \right)$$

czyli

$$\Delta n_3 = \Delta n_0 \left(\frac{k_g k_3}{1+k_2} \frac{r_p}{r_a} + 1 \right) \quad (10)$$

e) w układzie z ujemnym sprzężeniem napięciowym z odcięciem (proporcjonalnym do napięcia generatora) i ujemnym sprzężeniem prądowym z odcięciem (proporcjonalnym do prądu obciążenia), czyli tzw. zmodyfikowanym układzie Archangielskiego (rys. 7):

Przy odcięciu prądowym (p, wzór 4):

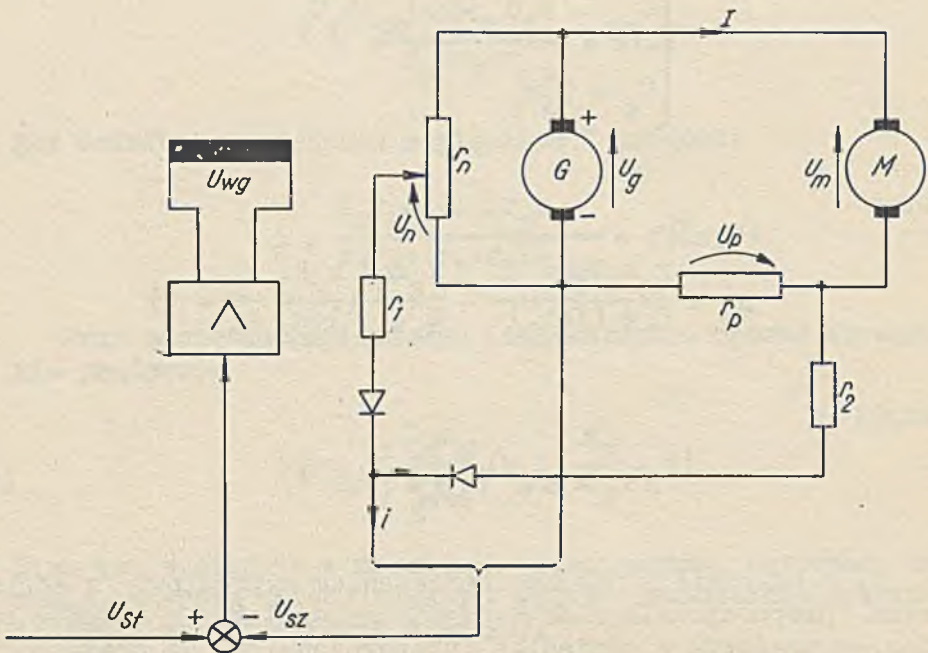
$$\Delta n_1 = \Delta n_0 \frac{r_{am}}{r_a} \text{ dla } k_g k_2 \gg 1$$

Przy odcięciu napięciowym (p, wzór 3):

$$\Delta n_2 = \Delta n_0 \left(k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1 \right)$$

Dla $n = 0$

$$I_{zw} = I_{zwo} \frac{1}{1 + k_g \frac{k_p}{g} \frac{r_p}{r_a}} \quad (11)$$



Rys. 7. Zmodyfikowany układ Archangielskiego

Gdy działają sprzężenia napięciowe i prądowe:

$$\begin{cases} E_g = k_g U_{wg} \\ E_g = C_m \delta_m n_m + I_a r_a \\ U_{wg} = k_1 U_{st} - k_2 (E_g - I_a r_a) - k_3 I_a r_p \end{cases}$$

Zestawienie otrzymanych wyników

Typ sprzężeń	Δn_1	Δn_2	Δn_3	I_{zw}	Uwagi
a) bez sprzężeń	$\Delta n_0 = \frac{I_a r_a}{0 \text{ mfm}}$	-	-	$I_{zwo} = \frac{k_g U_w g}{r_a}$	
b) ujemne sprz. prądowe i ujemne sprzężenie napięciowe z odciębem	$\Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} \frac{k_3}{k_2} \frac{r_p}{r_a} \right)$	$\Delta n_0 (k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1)$	-	$\frac{I_{zwo}}{1 + k_g k_3} \frac{r_p}{r_a}$	$k_g k_2 \gg 1$
c) ujemne sprz. napięciowe i ujemne sprzężenie prądowe z odciębem	$\Delta n_0 \frac{r_{am}}{r_a}$	$\Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} \frac{k_3}{k_2} \frac{r_p}{r_a} \right)$	-	$\frac{k_3}{I_{zwo} U_0} \frac{r_{am}}{r_a} \frac{r_p}{k_2} + \frac{r_{am}}{r_a}$	$k_g k_2 \gg 1$ k_3 - duże
d) w układzie Archangielskiego	Δn_0	$\Delta n_0 (k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1)$	$\Delta n_0 \left(\frac{k_g k_3}{1 + k_2} \frac{r_p}{r_a} + 1 \right)$	$\frac{I_{zwo}}{1 + k_g k_3} \frac{r_p}{r_a}$	
e) w zmodyfikowanym układzie Archangielskiego	$\Delta n_0 \frac{r_{am}}{r_a}$	$\Delta n_0 (k_g k_3 \frac{r_p}{r_a} + 1)$	$\Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} \frac{k_3}{k_2} \frac{r_p}{r_a} \right)$	$\frac{I_{zwo}}{1 + k_g k_3} \frac{r_p}{r_a}$	$k_g k_2 \gg 1$

Stąd

$$n_m = \frac{k_g k_1 U_{st}}{(1+k_g k_2) C_m \Phi_m} - \frac{I_a r_a}{C_m \Phi_m} \frac{1+k_g k_2 \frac{r_{am}}{r_a} + k_g k_3 \frac{r_p}{r_a}}{1+k_g k_2}$$

czyli

$$\Delta n_3 = \frac{I_a r_a}{C_m \Phi_m} \frac{\frac{1}{k_g k_2} + \frac{r_m}{r_a} + \frac{k_3}{k_2} \frac{r_p}{r_a}}{1 + \frac{1}{k_g k_2}}$$

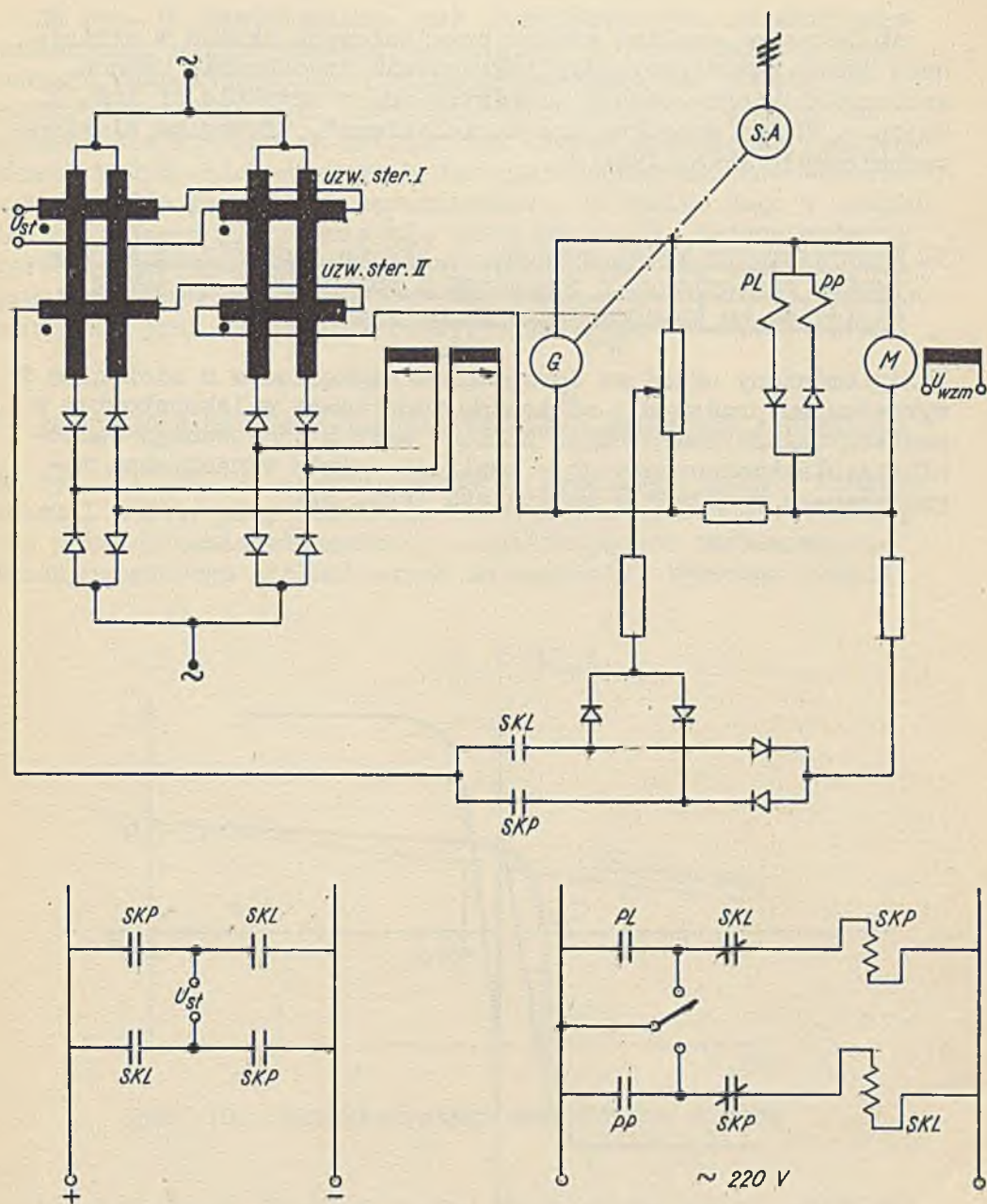
jeśli $k_g k_2 \gg 1$

$$\Delta n_3 = \Delta n_0 \left(\frac{r_{am}}{r_a} + \frac{k_3}{k_2} \frac{r_p}{r_a} \right) \quad (12)$$

4. Zalety układu ze sprzężeniem napięciowym z odcięciem i sprzężeniem prądowym z odcięciem

Jeśli porównać charakterystyki mechaniczne w pięciu wyżej omówionych przypadkach, widać, że najbardziej sztywną charakterystykę mają układy c) i e). Równocześnie dla zakresu Δn_2 charakterystyki mechanicznej układ e) ma własności podobne do własności układu b), tzn. zmniejszony maksymalny prąd (I_{zw}) przy rozruchu hamowaniu przy tym samym współczynniku fonsonowania.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że układ ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym z odcięciem i sprzężeniem zwrotnym prądowym z odcięciem w tzw. połączeniu Archangielskiego (sprzężenie zwrotne napięciowe brane z zacisków generatora) łączy w sobie zalety układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym napięciowym i ujemnym sprzężeniem zwrotnym prądowym z odcięciem, jeśli chodzi o zabezpieczenie napędu przed nadmiernymi przeciążeniami oraz jeśli chodzi o statyczną dokładność regulacji (sztywność charakterystyki mechanicznej) przy równoczesnym wyeliminowaniu konieczności stosowania dodatkowych napięć porównawczych.

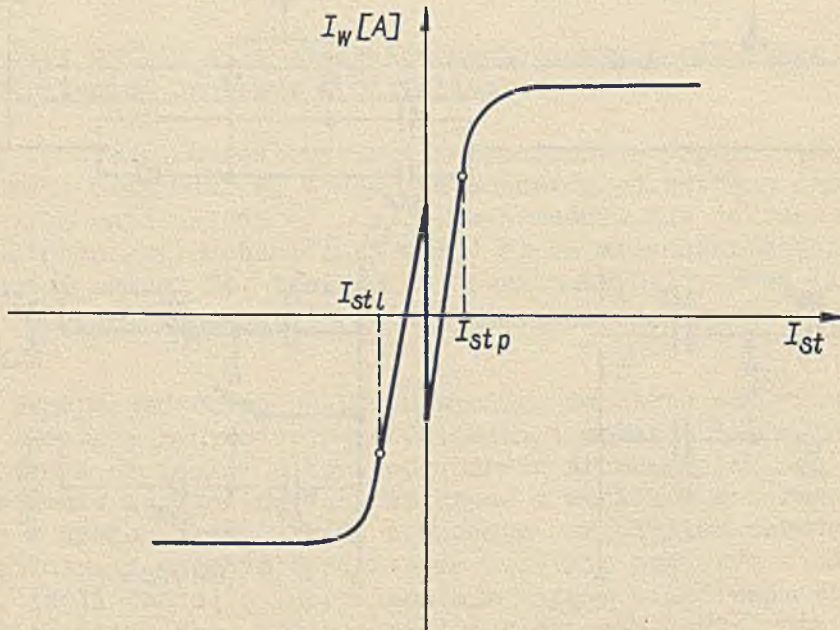


Rys. 8. Laboratoryjny model nawrotnego układu Leonarda

Analityczną analizę stanów przejściowych układu w niniejszej pracy pominięto, gdyż zagadnienie to odnośnie układu Archangielskiego zostało przedstawione w artykule dr inż. K. Wajsa - "Układ napędowy Archangielskiego", "Przegląd Elektrotechniczny", Nr 6, 1964 r.

5. Laboratoryjny model nawrotnego układu Leonarda ze sprzężeniem napięciowym z odcięciem i sprzężeniem prądowym z odcięciem ze wzmacniaczami magnetycznymi

Wyżej omówiony układ ze sprzężeniem napięciowym z odcięciem i sprzężeniem prądowym z odcięciem zmontowano w laboratorium w postaci układu nawrotnego. Zamiast zwykle stosowanego wzmacniacza elektromaszynowego - amplidyndy użyto wzmacniacza magnetycznego w układzie amplistatu (rys. 8).

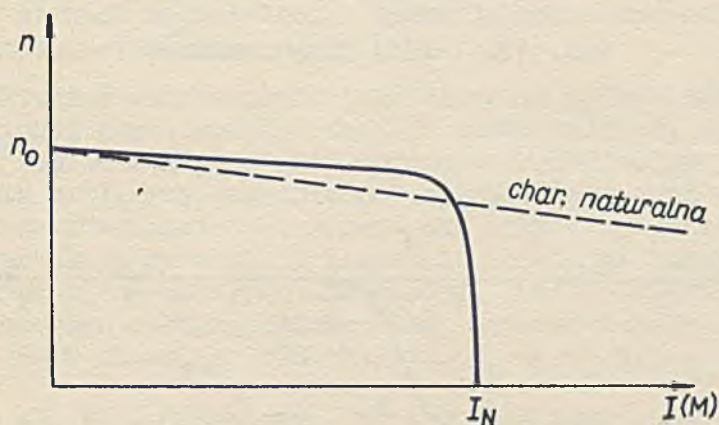


Rys. 9. Charakterystyka rewersyjnego wzmacniacza magnetycznego z układu rys. 8

Na rys. 9 przedstawiona jest charakterystyka rewersyjnego wzmacniacza magnetycznego, pracującego w tym układzie. Tego rodzaju charakterystyka wynika z zamykania się obwodu parzystych harmonicznych uzwojenia sterującego II przy braku sygnału sterującego na uzwojeniach sterujących I. Na prostownikach układu nieliniowego N następuje jednopokółkowe prostowanie prądów parzystych harmonicznych. W wyniku tego w uzwojeniu sterującym II pojawia się składowa stała, dająca wstępne wystereowanie wzmacniacza magnetycznego. Nie ma to jednak żadnego istotnego wpływu na poprawną pracę układu, który pracuje normalnie przy prądzie ster. I_{stp} lub I_{stl} .

6. Zachowanie się układu przy rozruchu, hamowaniu i nawrocie

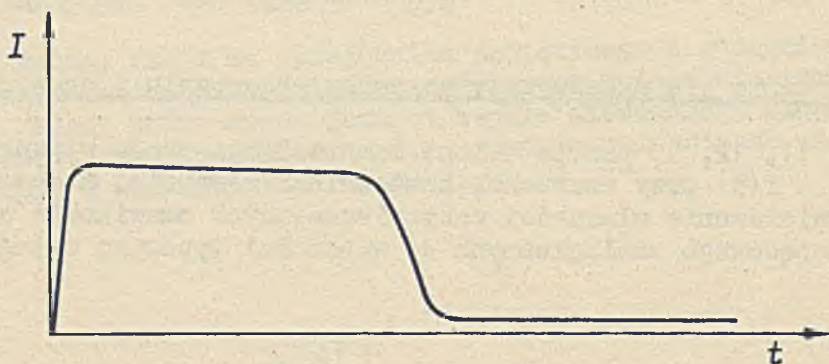
Na rys. 11, 12, 13 przedstawione są przebiegi prądu w funkcji czasu $I = f(t)$ przy rozruchu, hamowaniu i nawrocie. Stanowią one potwierdzenie własności zabezpieczających omawianego układu napędowego analogicznych do własności typowego układu



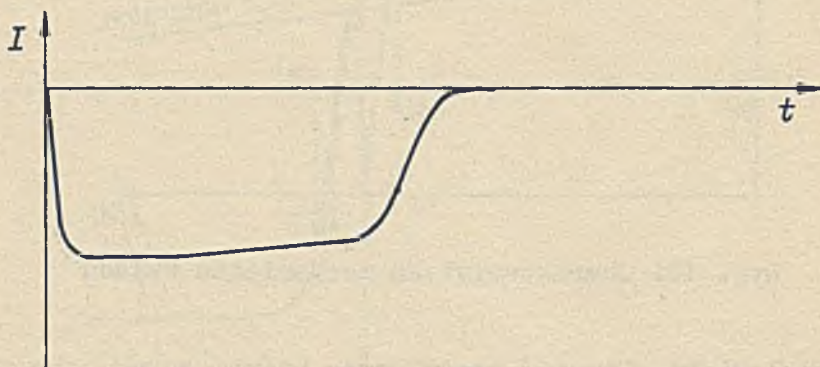
Rys. 10. Charakterystyka mechaniczna układu

Archangielskiego. Wartość prądu, przy którym odbywa się rozruch względnie hamowanie, zależy oczywiście od wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego. Im większe wzmocnienie toru sprzężenia prądowego, tym mniejsza wartość prądu stabilizowanego

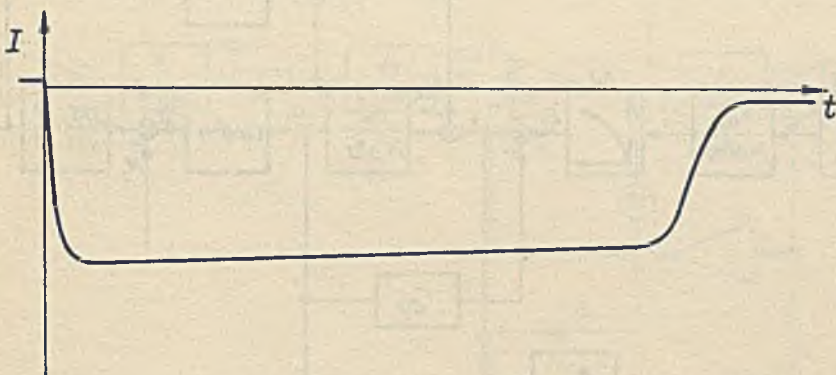
przez układ. Z drugiej strony im większe wzmocnienie układu, tym lepsza statyczna dokładność regulacji. Tak więc dokładność regulacji (sztywność charakterystyk mechanicznych) jest w tym układzie ograniczona przez warunki, jakie musi spełniać układ, jeśli ma zabezpieczać napęd przed przeciążeniem.



Rys. 11. $I=f(t)$ przy rozruchu



Rys. 12. $I=f(t)$ przy hamowaniu

Rys. 13. $I=f(t)$ przy nawrocie

7. Badanie własności dynamicznych układu

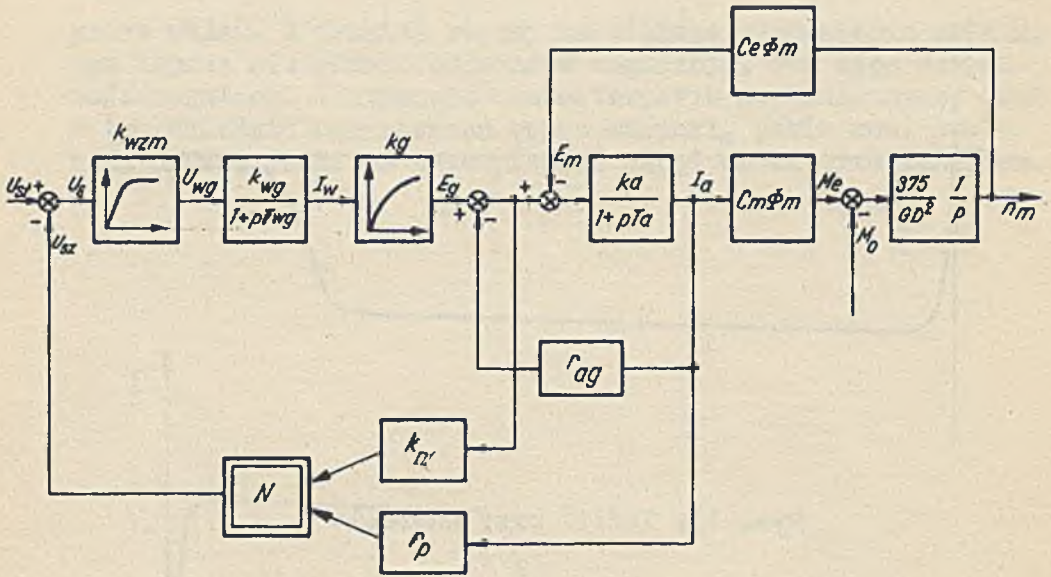
Do badania własności dynamicznych układu, zachowania się układu w stanach nieustalonych można zaproponować schemat blokowy przedstawiony na rys. 14.

Analityczne rozpatrzenie tego schematu wydaje się być nieuzasadnione, gdyż prowadzi do zbyt nieczytelnych, zawiłych rozwiązań. Ponieważ najbardziej istotnym zagadnieniem przy zastąpieniu amplidyny wzmacniaczem magnetycznym jest wzrost stałej czasowej wzmacniacza, sprawdzono wpływ tej stałej czasowej na przebieg rozruchu i hamowania modelując konkretny układ napędowy na maszynie analogowej. Dane potrzebne do schematu blokowego zostały dobrane tak, by odpowiadały maszynom o mocy 15-20 kW, $n_N = 1500$ obr/min, $U_N = 230$ V, $r_{ag} = r_{am} = 0,2 \Omega$

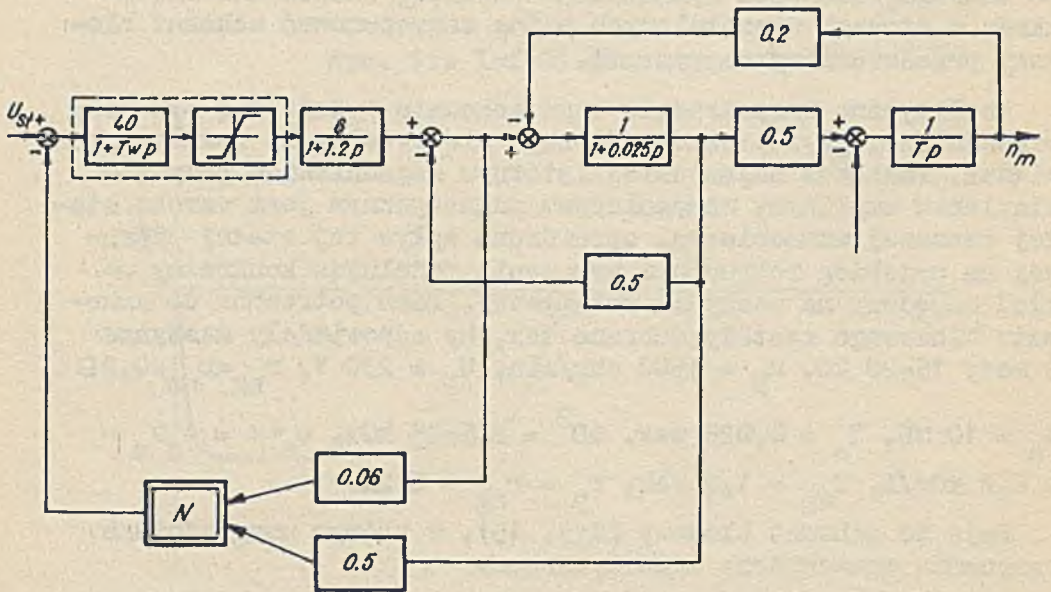
$L_a = 10$ mH, $T_a = 0,025$ sek, $GD^2 = 2,5-25$ kGm, $c_{\Phi m} = c_{e m} = 0,2$ kGm/A, $T_{wg} = 1,2$ sek, $r_p = r_{ag} = 0,2 \Omega$.

Daje to schemat blokowy (rys. 15), w którym uwzględniono nasycenia wzmacniacza magnetycznego.

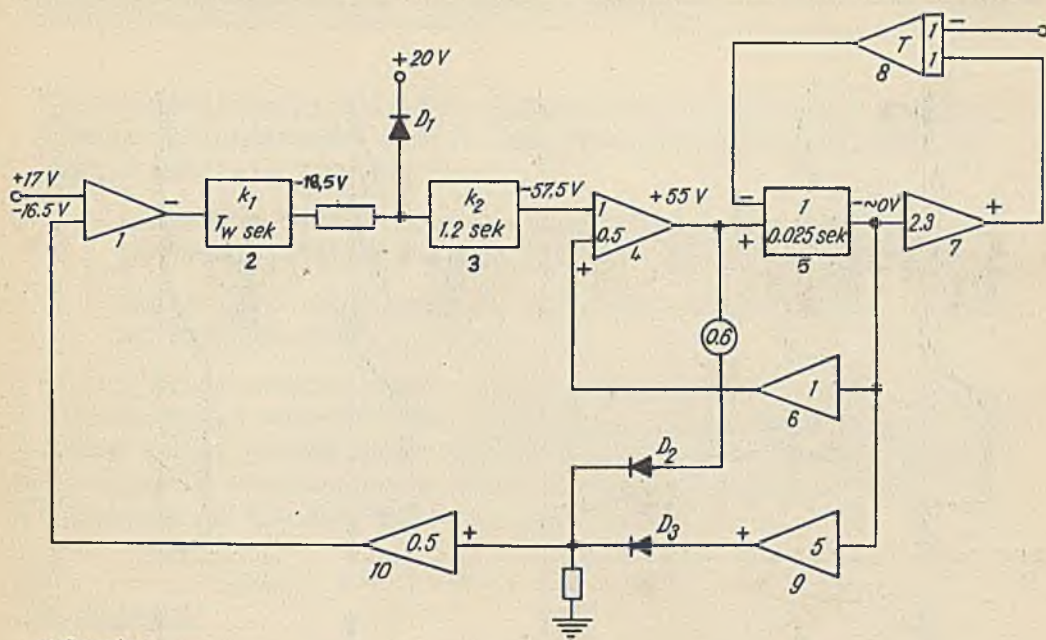
Układ ten zamodelowano na maszynie analogowej (zamodelowano tylko układ nienawrotny). Schemat połączeń dla maszyny podany jest na rys. 16. Ponieważ chodziło tylko o jakościowe



Rys. 14. Schemat blokowy układu

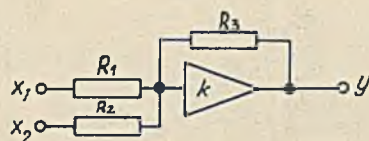
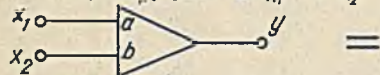


Rys. 15. Schemat blokowy konkretnego układu napędowego



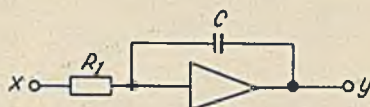
a) Sumator

$$\Psi = -(aX_1 + bX_2) \text{ gdzie } a = \frac{R_3}{R_1}; b = \frac{R_3}{R_2}$$



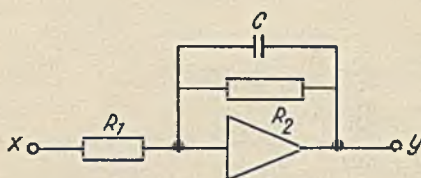
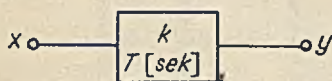
b) Element całkujący

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = -\frac{1}{pT} \text{ gdzie } T = R_1C$$

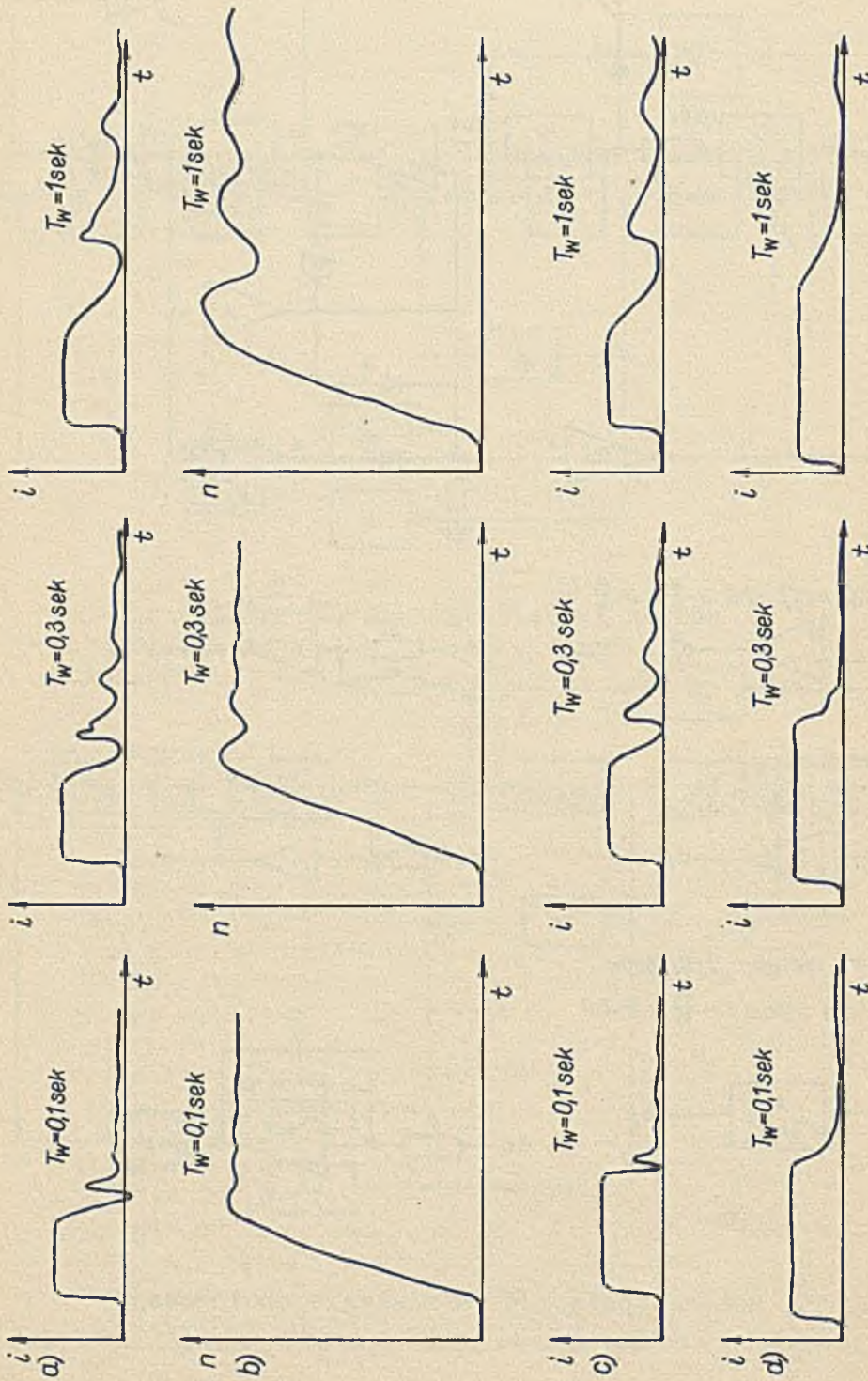


c) Element inercyjny I-go rzędu

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = -\frac{k}{1+pT} \text{ gdzie } k = \frac{R_2}{R_1}; T = R_2C$$



Rys. 16. Schemat połączeń na maszynie analogowej



Rys. 17. Przebiegi

a), b) $i = f(t)$ oraz $n = f(t)$; c) $i = f(t)$ dla silniejszego sprzężenia prądowego;
 d) $i = f(t)$ dla bardzo silnego sprzężenia prądowego

rozpatrzenie wpływu pewnych parametrów na zachowanie się układu, nieliniowości występujące w układzie zostały zamodelowane możliwie prosto, tj.:

- nasycenie wzmacniacza magnetycznego przez włączenie odpowiednio spolaryzowanej diody D_1 za wzmacniaczem 2;
- nieliniowy układ prostowników został zachowany - reprezentują go diody D_2 i D_3 .

Przy modelowaniu trzeba było uwzględnić odwracanie znaku sygnału przez wzmacniacze operacyjne, pewne obciążanie wzmacniaczy przez wprowadzone układy diodowe oraz uwzględniono, by napięcia odejmowane na wzmacniaczach sumujących oraz porównywane na diodach były możliwie duże.

8. Wnioski

Przebiegi zaobserwowane na modelu wykazały istotny wpływ stałej czasowej wzmacniacza magnetycznego na zachowanie się układu w stanach przejściowych (rozruch, hamowanie), (porównaj rys. 17a,c,d dla różnych T_w). Widać wyraźne pogorszenie się jakości regulacji przy zwiększaniu stałej czasowej. Powiększanie stałej czasowej całkowania (większe GD^2) oraz obciążanie silnika nie zmieniało charakteru przebiegów nieustalonych, przedłużając jedynie długość ich trwania.

Na podstawie przeprowadzonych badań można ocenić możliwość zastąpienia amplidyny przez wzmacniacze magnetyczne w rozpatrywanym układzie napędowym. Biorąc pod uwagę fakt, że inercja wzmacniaczy magnetycznych jest większa aniżeli amplidyn, przy czym im większe moce tych urządzeń, tym mniej korzystnie przedstawia się ta sprawa dla wzmacniaczy magnetycznych, można powiedzieć, że zastąpienie amplidyn amplistatami jest celowe dla napędów o niezbyt dużych mocach (do kilkudziesięciu kW). Przemawia za tym również konieczność dysponowania w tym układzie stosunkowo dużymi wartościami wzmocnienia w głównej pętli sprzężenia zwrotnego. Wynika to z zastosowań tego rodzaju napędu, w których istotną rolę odgrywa konieczność odpowiednio silnego forsowania wzbudzenia, a im większy współczynnik forsowania, tym większe wzmocnienie musi mieć wzmacniacz. Zwiększanie wzmocnienia amplistatu związane jest z powiększaniem jego stałej czasowej.

Biorąc to pod uwagę można stwierdzić, że zastąpienie amplitudyny wzmacniaczem magnetycznym w omawianym układzie napędowym Leonarda wydaje się być wskazane w wypadku nie za dużych mocy. W tym przypadku zalety wzmacniaczy magnetycznych takie jak: pewność działania, długowieczność, nieczułość na wstrząsy, możliwość przeciążeń, niekłopotliwa eksploatacja przemawiają za ich zastosowaniem, a ze względu na niewielkie jeszcze stałe czasowe zapewniają one te same właściwości regulacyjne co amplitudyna. Jednak, gdy moc napędu rośnie, pogarszanie własności regulacyjnych, jakie wnosi rosnąca stała czasowa amplitudyny, zaczyna przeważać nad jego zaletami eksploatacyjnymi i w tych wypadkach byłoby niecelowe wprowadzanie tych urządzeń na miejsce amplitudyn. O tym, czy dla danego układu napędowego omawianego typu opłaca się zastąpienie amplitudyny wzmacniaczem magnetycznym decydują wymagania, co do jakości przebiegów nieustalonych, stawiane przed tym układem.

Pracę, będącą treścią artykułu, autor wykonał z inicjatywy prof. dr J. Siwińskiego w laboratorium Katedry Automatyki Procesów Przemysłowych Politechniki Śląskiej.

Przy badaniu modelowym układu laboratoryjnego autor korzystał z maszyny analogowej Katedry Teorii Regulacji Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] Siwiński J.: "Automatyka napędu elektrycznego", PWT, Warszawa 1960.
- [2] Giloi W., Lauber R.: "Analogrechnen", Springer-Verlag, 1963.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 30.IX.1965 r.

СВОЙСТВА РЕВЕРСИВНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕОНАРДА С ОТСЕЧКОЙ ТОКА
И НАПРЯЖЕНИЯ С МАГНИТНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Резюме

В работе рассмотрена система Леонарда с так называемой "аксаваторной" механической характеристикой, полученной с помощью применения отрицательной обратной связи по напряжению с отсечкой (пропорциональной к напряжению генератора), а также отрицательной обратной связи по току с отсечкой (пропорциональной току нагрузки). Таким образом получается так называемая модифицированная система Архангельского. В такой системе отсутствует гальваническая связь цепей якоря и возбуждения.

Дано анализ точности регулирования скорости двигателя получаемой при применении различного типа обратных связей с точки зрения жесткости механической характеристики и обращая внимание на преимущества модифицированной системы Архангельского.

Приведено описание лабораторной модели системы и ее характеристики, полученные экспериментально. В отличие от до сих пор применяемых систем в место электромашинного усилителя применено реверсивных магнитный усилитель.

Система была моделирована на аналоговой машине, что дало возможность исследовать ее динамические свойства.

Проведенные автором исследования подтверждают целесообразность применения магнитного усилителя, который является более дешевым и надежным элементом для приводов малой мощности по сравнению с электромашинным усилителем.

THE PROPERTIES OF REVERSIBLE TORQUE-LIMITED
WARD-LEONARD DRIVE
WITH MAGNETIC AMPLIFIER

Summary

The author considers the torque-limited Ward-Leonard drive. The system has a negative nonlinear feedback from the generator voltage and a nonlinear negative feedback from the load current. Due to the voltage feedback the galvanic coupling between the armature and exciting circuits are avoided. Such a drive is called the modified Archangielsky's system. A steady-state analysis has been made for different kinds of feedback. The advantages of the modified Archangielsky's system have been discussed.

A laboratory model of the system mentioned has been described and appropriate test data have been presented. Instead of a rotating amplifier (an amplidyne) there has been applied a reversible magnetic amplifier in that system.

An analog-computer study of the dynamic properties was conducted, and the obtained data are presented.

The conclusion is that it is desirable to replace the rotating amplifier by the magnetic amplifier possessing slightly inferior dynamic properties because of its maintenance advantages particularly for small power driving systems.