

Piotr ZALEŚNY

MOŻLIWOŚCI MODERNIZACJI GÓRNICZYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH Z ZASTOSOWANIEM PRZEKSZTAŁTNIKÓW TYRYSTOROWYCH

Streszczenie: W niniejszym artykule rozważono możliwości przebudowy starych maszyn wyciągowych w oparciu o przekształtniki tyrystorowe. Przedstawiono przykładowy projekt modernizacji maszyny wyciągowej pracującej w układzie Leonarda.

Projekt zakłada minimalny koszt i najkrótszy czas remontu. Zastosowano przebudowę obwodów wzbudzeń prądnic i silnika Leonarda oraz zaprojektowano nowy układ sterowania i regulacji. Przedstawiono sposób przejścia ze schematu rzeczywistego na blokowy, a następnie, posługując się tym schematem zastępczym, dobrano nastawy regulatorów wg kryterium Kesslera. Porównano charakterystyki układu przed i po modernizacji oraz oszacowano dodatkowe straty w maszynach prądu stałego, wynikię na skutek pojawienia się we wzbudzeniu wyższych harmonicznych prądu.

WSTĘP

W dobie kryzysu energetycznego pojawiła się konieczność przebudowy wielu układów i urządzeń oraz zastosowania w nich energooszczędnych rozwiązań technicznych. Szczególnie wiele starych i potrzebujących modernizacji napędów dużej mocy pracuje w przemyśle ciężkim i wydobywczym.

W ostatnich latach coraz szerzej w urządzeniach przemysłowych i procesach technologicznych stosuje się elementy półprzewodnikowe dużej mocy.

Powodowane jest to szeregiem zalet, jakimi charakteryzują się te elementy:

- małe wymiary,
- łatwość sterowania,
- wysoka sprawność energetyczna,
- dobra dynamika układów półprzewodnikowych.

Również w przemyśle wydobywczym półprzewodniki znajdują coraz szersze zastosowanie.

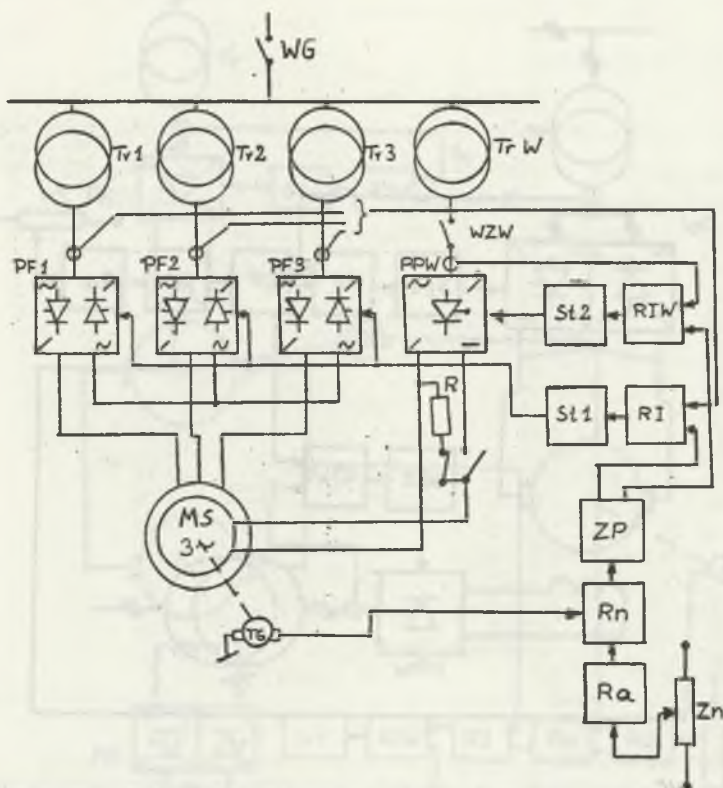
W starych napędach górniczych maszyn wyciągowych najczęściej stosowano układ Leonarda, ze względu na możliwość sterowania w szerokim zakresie prędkości obrotowej w obu kierunkach oraz dobre własności regulacyjne. Układy te w dniu dzisiejszym są już wysłużone, uciążliwe dla obsługi oraz nie spełniają wymogów stawianych przed nowoczesnym napędem. Stąd zaistniała konieczność ich wymiany lub modernizacji. Modernizację taką można przeprowadzić kilkoma torami, a wybór możliwości zależny będzie od potrzeby, warunków technicznych i możliwości finansowych przedsiębiorstwa.

W niniejszej pracy przedstawiono niektóre możliwe warianty przebudowy maszyny wyciągowej oraz dokładniej omówiono jeden z projektów.

1. MOŻLIWOŚCI MODERNIZACJI

Jednym ze sposobów przeprowadzenia przebudowy starej maszyny wyciągowej jest zastąpienie całości układu (np. Leonarda) przez silnik synchroniczny zasilany z cyklokonwertora. Cyklokonwertor umożliwia sterowanie w zakresie niskich prędkości (wymaganych przy jeździe klatki szybowej). Sterowanie silnika odbywa się częstotliwościowo, a energia jest przekształcona jednokrotnie, co przy dużej mocy urządzenia ogranicza straty. Użycie silnika synchronicznego dużej mocy nie pogarsza $\cos\phi$ kopalni, a nawet może pozwalać na pewną kompensację mocy biernej. Układ taki byłby ponadto o wiele prostszy i łatwiejszy w sterowaniu oraz mniej uciążliwy dla obsługi. Wadą rozwiązania jest duży koszt inwestycyjny oraz konieczność filtrowania harmonicznych, jakie do sieci zasilającej mogłyby się przenosić z cyklokonwertora. Przekształtnik musiałby przenosić duże prądy, zasilając silnik o mocy 2-5 MW, co dodatkowo może utrudnić jego konstrukcję. Przebudować należałoby też nadszynie. Koncepcję tego projektu pokazano na rys.1.

Innym rozwiązaniem, wykorzystującym silnik prądu stałego, który pracował do tej pory w modernizowanym układzie Leonarda, jest zasilanie silnika z prostowników. Jeden z nich zasila silnik zastępując zespół przetwornicy z układu Leonarda, a drugi zasila wzbudzenie, zastępując wzbudnice elektromaszynowe. Przez eliminację przetwornic wirujących poprawiłyby się warunki pracy, układ byłby mniejszy, łatwiejszy do konserwacji i bardziej niezawodny. Poprawiłyby się również jego sprawność. Inwestycje ograniczyłyby się tylko do budowy prostowników i nowego układu sterowania i regulacji,

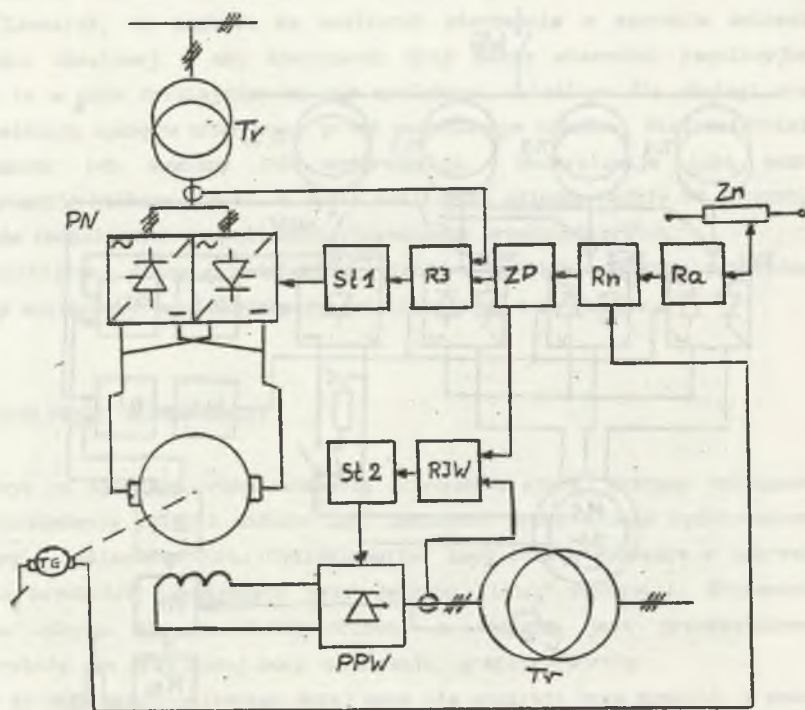


Rys.1. Schemat obwodów głównych układu napędowego z zastosowaniem cyklokonwertora do zasilania silnika synchronicznego

Fig.1. Diagram of power transmission system main circuits with application of cycloconverter to feed synchronics engine

natomiast sam silnik i mechanika szybu pozostałyby niezmiennione, co w znacznym stopniu ogranicza koszty i czas przeprowadzenia modernizacji. Uproszczony układ przedstawia rys.2.

W kolejnym wariantcie, maszynę wyciągową można modernizować w oparciu o dotychczasowy układ Leonarda, przy założeniu minimum kosztów. Projekt obejmowałby przebudowę jedynie wzbudnic silnika i prądnicy oraz budowę nowego układu sterowania i regulacji. Zachowując zalety, jakie posiada układ Leonarda, wprowadza się udoskonalone wzbudnice tyrystorowe. Oprócz poprawienia warunków pracy obsługi, ułatwienia konserwacji i napraw układu,



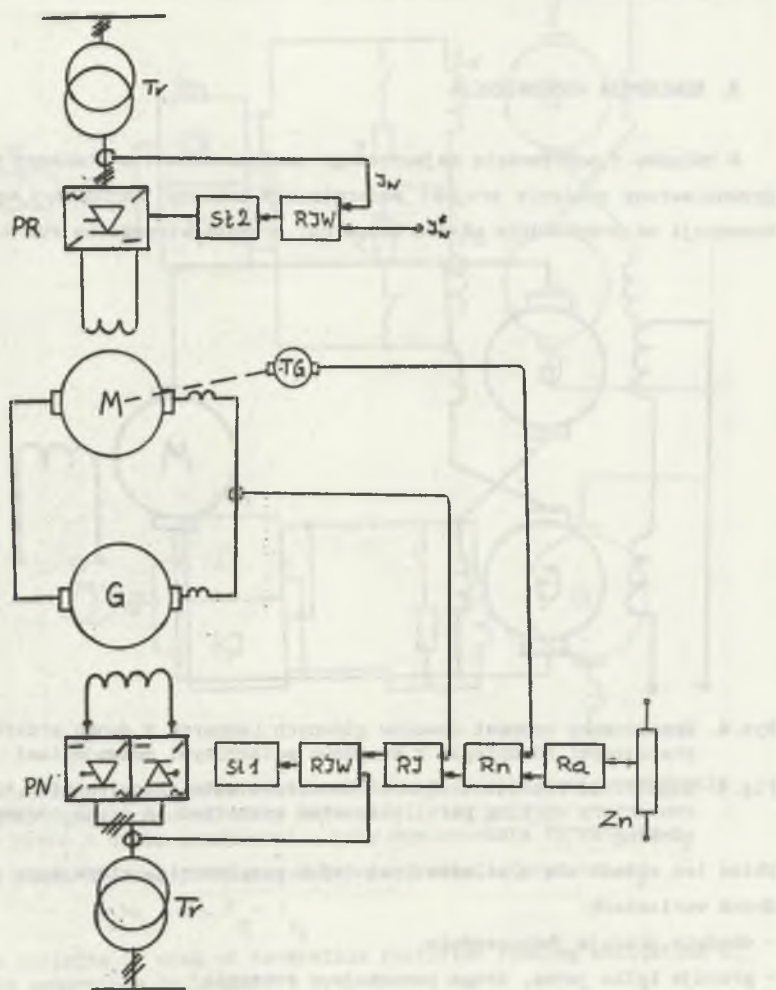
Rys. 2. Schemat obwodów głównych układu napędowego z silnikiem obcowzbudnym zasilanym z prostowników

- PN - prostownik nawrotny
- PPW - prostownik wzbudzenia

Fig. 2. Diagram of power transmission system main circuits with separately excited engine red from rectifiers:

- PN - reversible rectifier
- PPW - rectifier of excitation

uzyskuje się poprawienie sztywności charakterystyk mechanicznych silnika. Z obwodów wzbudzeń zostają też wyeliminowane wzmacniacze magnetyczne. Dzięki swemu ograniczonemu zakresowi i niskim kosztom, ten projekt można realizować w bardzo szerokim zakresie, dostosowując go łatwo do indywidualnych potrzeb. Uproszczony schemat przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Napęd w układzie Leonarda z tyrystorowymi wzbudnicami

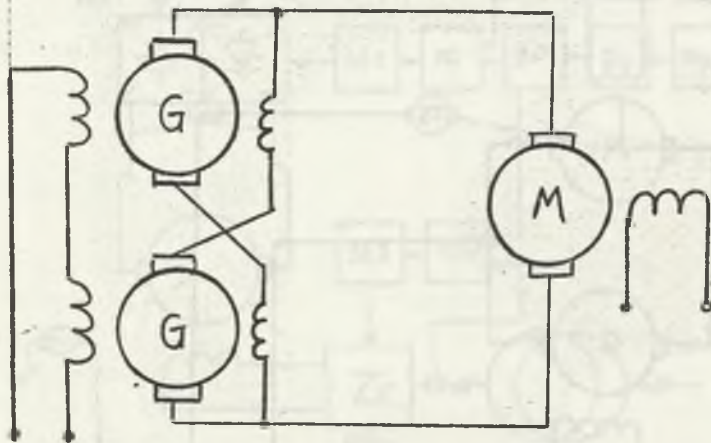
- PN - przekształtnik nawrotny
- PR - przekształtnik nienawrotny

Fig. 3. Drive in Leonard's system with thyristor exciters

- PN - reversible inverter
- PR - irreversible inverter

2. KONCEPCJA MODERNIZACJI

W związku z możliwością najszerszego zastosowania i najtańszej realizacji przedstawiony zostanie projekt modernizacji maszyny wyciągowej wg trzeciej koncepcji na przykładzie układu Leonarda, przedstawionego na rys. 4.



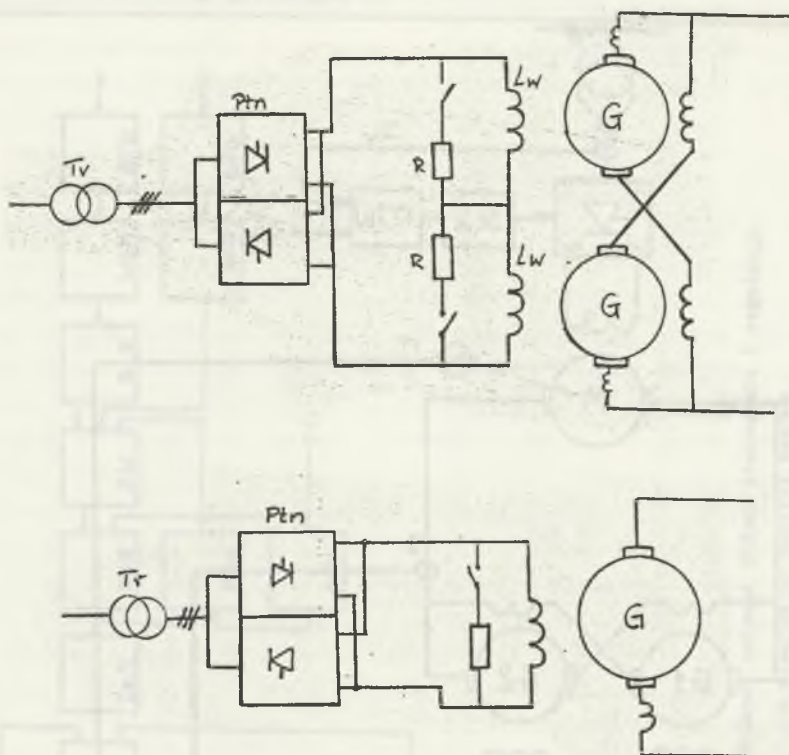
Rys. 4. Uproszczony schemat obwodów głównych Leonarda z dwoma przetwornicami pracującymi równoległe z krzyżowo połączonymi dozwojeniami

Fig. 4. Simplified representation of Leonard's main circuits with two converters working parallelly with connected in cross compensating winding

Układ ten składa się z silnika oraz dwóch przetwornic, które mogą pracować w dwóch wariantach:

- obydwie pracują jednocześnie,
- pracuje tylko jedna, druga pozostaje w rezerwie.

Zakładamy modernizację jedynie obwodów wzbudzeń prądnic i silnika. Układ powinien zapewnić możliwość pracy z jedną lub z dwoma przetwornicami, tak jak jest to realizowane w "starym" układzie (rys.5). W obu przypadkach wzbudzenie prądnic zasilane będzie ten sam przekształtnik nawrotny, zasilany z transformatora. Napięcie zasilające wzbudzenie prądnicy regulowane będzie przez zmianę kąta wysterowania odpowiednich tyrystorów przekształtnika. Dla wariantu pracy z jedną przetwornicą odpowiednie napięcie uzyskamy przez zwiększenie kąta α . Wzbudzenie silnika zasilane będzie z nierewersyjnego



Rys. 5. Dwa warianty pracy prostownika nawrotnego zasilającego wzbudzenie prądnic głównych w układzie Leonarda

- a- praca z dwoma prądnicami - kąty wysterowania tyrystorów α_1
- b- praca z jedną prądnicą - kąt wysterowania tyrystora α_2

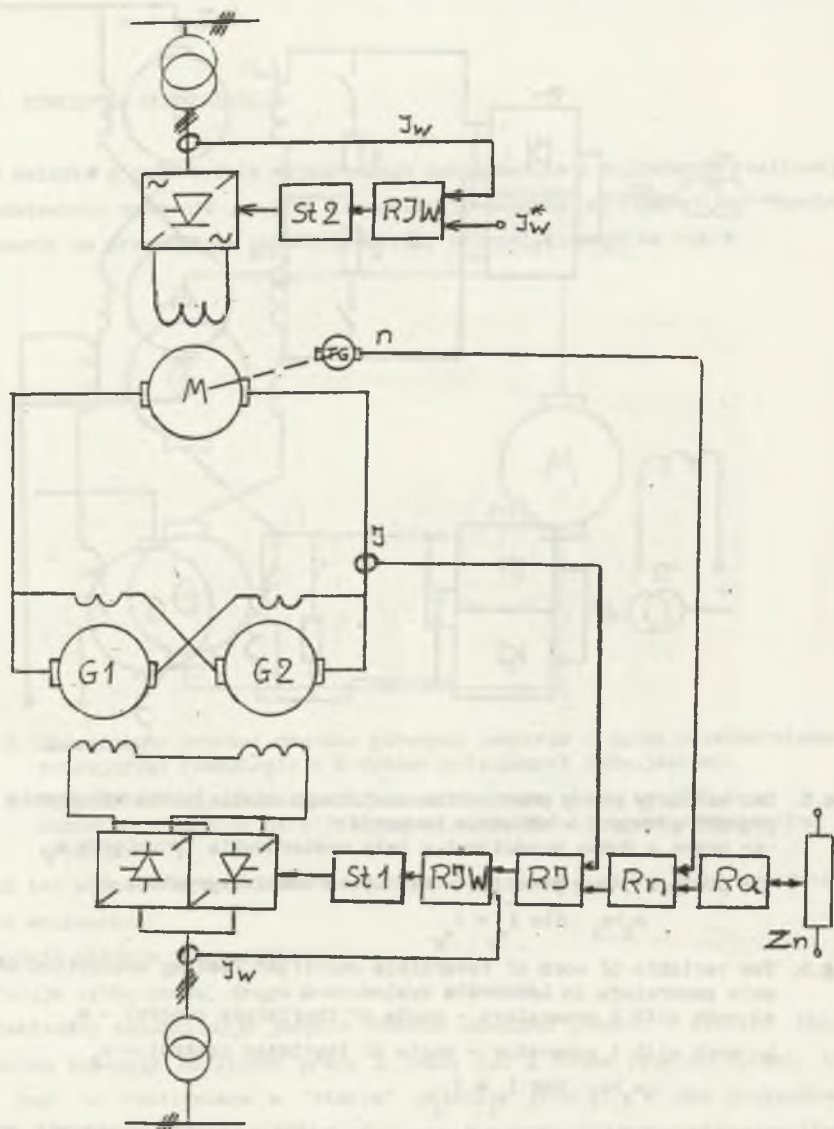
$$\alpha_2 > \alpha_1 \text{ dla } I_{w_1} = I_{w_2}$$

Fig. 5. Two variants of work of reversible rectifier feeding excitation of main generators in Leonard's system

- a) work with 2 generators - angle of thyristors control - α_1
- b) work with 1 generator - angle of thyristor control - α_2

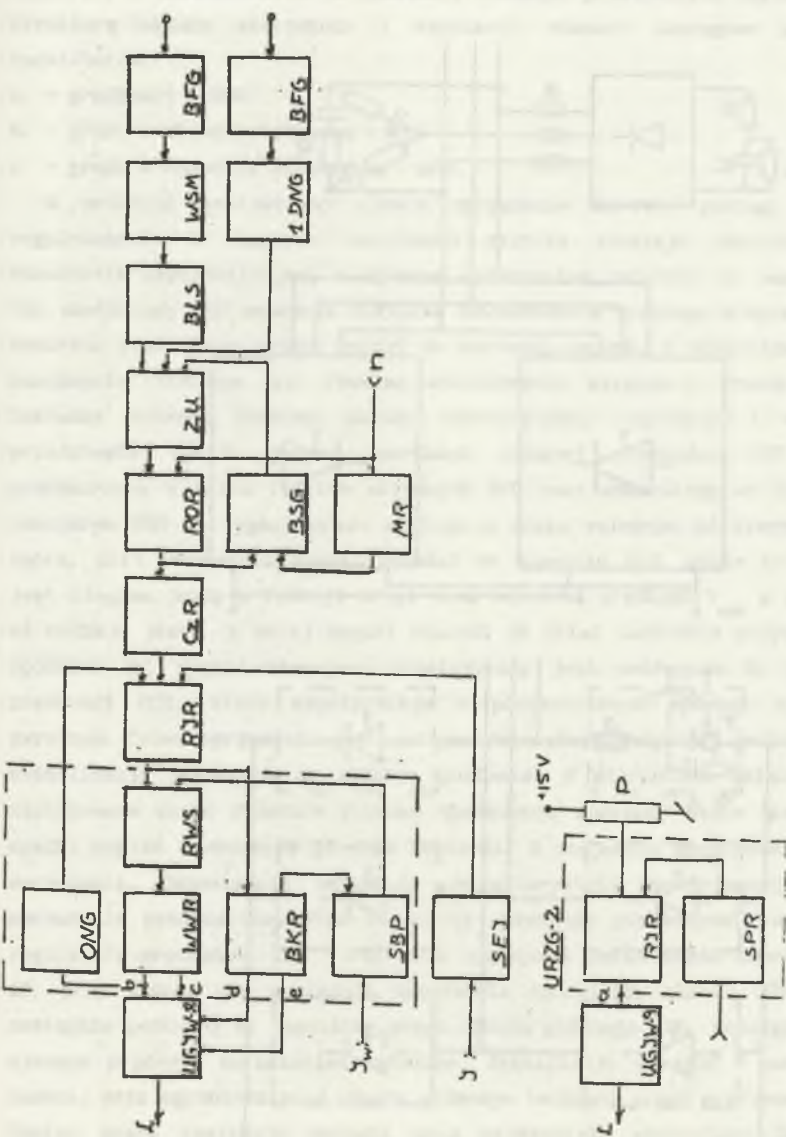
$$\alpha_2 > \alpha_1 \text{ for } I_{w_1} = I_{w_2}$$

prostownika sterowanego. W czasie postoju możliwe będzie obniżenie prądu wzbudzenia do 75% jego wartości znamionowej. Napęd będzie posiadał układ automatycznej regulacji (UAR), który zapewni dokładne odwzorowanie zadanego diagramu jazdy oraz zlikwidowanie do zera prądu w obwodzie głównym w czasie postoju maszyny wyciągowej. Obwód siłowy składa się z klasycznego układu



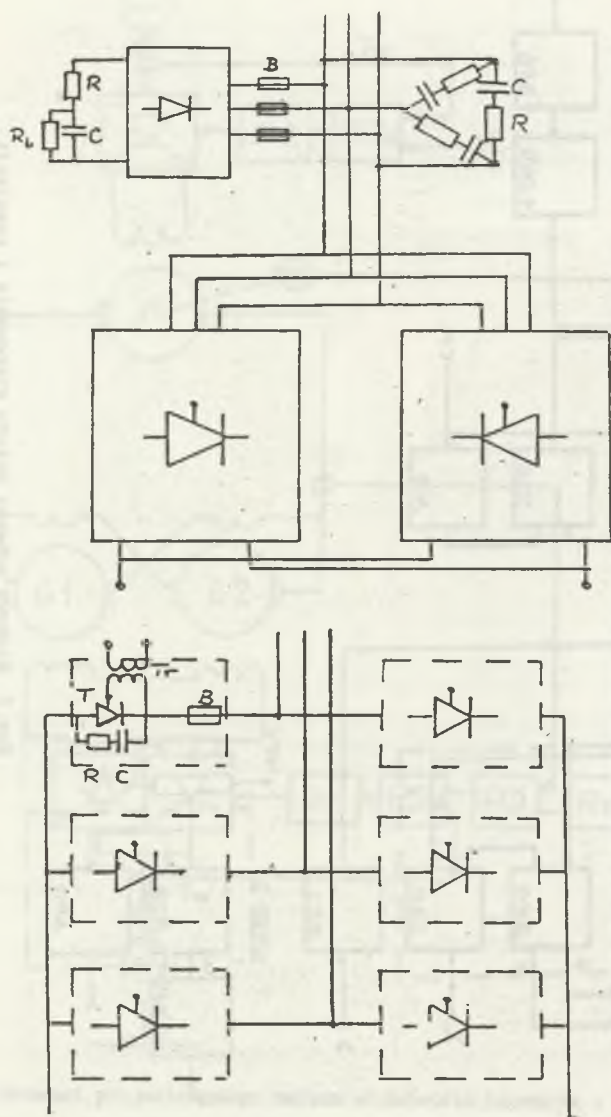
Rys.6. Schemat projektowanego napędu w układzie Leonarda z dwoma przetwornicami i wzбудnicami tyrystorowymi

Fig.6. Diagram of projected drive in Leonard's system with 2 converters and thyristor inductors



Rys. 7. Blokowy schemat układu sterowania i regulacji

Fig. 7. Block diagram of control system



Rys. 8. Schemat nawrotnego prostownika tyrystorowego zasilajacego wzbudzenie prądnicy Leonarda

Fig. 8. Diagram of reversible thyristor rectifier feeding excitation of Leonard's generator

Leonarda, z zastosowaniem do zasilenia wzbudzeń prostowników tyrystorowych. Strukturę układu sterowania i regulacji stanowi szeregowo połączenie regulatorów:

- a. - prędkości - ROR
- b. - prądu w obwodzie głównym - RIR
- c. - prądu w obwodzie wzbudzenia - RIW.

W układzie zastosowano ujemne sprzężenie zwrotne podług wielkości regulowanych. W obwodzie wzbudzenia silnika istnieje regulator prądu wzbudzenia współdziałający z ujemnym sprzężeniem zwrotnym od tegoż prądu. Tak zestawiony UAR zapewnia dokładne odwzorowanie zadanego diagramu jazdy, kontrolę prądu oraz szybki wzrost do wartości zadanej i stabilizację prądu wzbudzenia. Możliwe jest również odzwbudzenie silnika w czasie postoju. Dokładny schemat blokowy układu automatycznej regulacji i sterowania przedstawia rys.7. Sygnał wartości zadanej prędkości "Z" zostaje przetworzony w bloku filtrów aktywnych BFG oraz wzmacniany we wzmacniaczu sumującym WSM na sygnał prądu stałego o znaku zależnym od kierunku jazdy (górze, dół). Następnie sygnał wchodzi do elementu BLS, gdzie kształtowany jest diagram jazdy w funkcji drogi oraz ustalona prędkość V_{max} w zależności od rodzaju jazdy, a dalej sygnał wchodzi na układ zadawania przyspieszeń i opóźnień ZU. Sygnał sterujący przekazywany jest następnie do regulatora prędkości ROR, który współpracuje z prędkościowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Celem sprzężenia jest usztywnienie charakterystyki mechanicznej i stabilizacja prędkości na zadanym poziomie. W pierwotnym układzie było zastosowane słabe dodatnie prądowe sprzężenie zwrotne, które kompensowało spadki napięć w obwodzie głównym Leonarda. W projekcie zrezygnowano z tego sprzężenia. Odpowiednia sztywność charakterystyki mechanicznej zapewnia sprzężenie prędkościowe oraz właściwie określony współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości. CzR - regulator szybkości zmian prądu zapewnia takie dI , przy którym nie występują zaburzenia dynamiczne układu. Sygnał jest następnie podawany na regulator prądu obwodu głównego RIR, współpracujący z ujemnym prądowym sprzężeniem zwrotnym. Stabilizuje on prąd I na wartości zadanej oraz ogranicza prąd obwodu głównego (ochrona przed przetężeniem). Pomiar prądu realizuje boczny oraz przetwornik separujący SEI. Układ nadrzędnego ograniczenia wartości zadanej prędkości 1DNG ogranicza napięcia wyjściowe regulatora przyspieszeń w funkcji drogi jazdy sterowany jest przez blok filtrów aktywnych BFG sygnałem z zadajników indukcyjnych sprzężonych z krzywkowym regulatorem jazdy. Układ ograniczenia wielkości sygnału zadanej

wartości prądu BSG zrealizowano, jako ujemne sprzężenie zwrotne ze sterowanym progami przyspieszeń. Przy przekroczeniu nastaw wartości dopuszczalnej prądu sprzężenie to utrzymuje sygnał wyjściowy ZU na stałym poziomie, równym aktualnej prędkości napędu. Próg zadziałania BSG sterowany jest modulem sygnału sprzężenia prędkościowego z członu modułowego BMR. Pomiar n realizuje tachoprądnica. Sygnał wyjściowy z regulatora prądu stanowi wzorzec prądu wzbudzenia podawany na regulator I-RWS, który jest w części sterowniczo-regulacyjnej prostownika UZRG-1. Prostowniki zastosowane do zasilania wzbudzeń prądnic głównych są przekształtnikami nawrotnymi typu PTn 2x1,2/0,46. Schemat przekształtnika nawrotnego przedstawia rys. 8. Przekształtniki posiadają wspólną ochronę od przepięć komutacyjnych włączane międzyfazowo, połączone w trójkąt, trzy elementy RC. Układem ochrony od przepięć łączeniowych jest element RC włączony pomiędzy przewody zasilające poprzez mostek diodowy III fazowy. Prostownik w swojej części sterowniczo-regulacyjnej posiada regulator prądu wzbudzenia oraz ujemne sprzężenie zwrotne podług wielkości regulowanej. Prostownik pracuje z blokadą prądów wyrównawczych.

3. OSZACOWANIE DODATKOWYCH STRAT W MASZYNACH PRĄDU STAŁEGO ZE WZGLĘDU NA ZASILANIE ICH WZBUDZEŃ PRĄDEM I NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM WYŻSZE HARMONICZNE

Uzwojenia maszyn zasilane są z prostowników sześćo pulsowych. Harmoniczne, które mogą pojawić się w prądzie i napięciu, to harmoniczne:

$$n=6, 12, 18, 24, 30 \dots$$

W rozważaniach pomijamy wpływ komutacji.

Dla obliczenia wartości skutecznych napięcia i prądu wyższych harmonicznych, korzystamy z zależności:

a) dla pełnegoysterowania ($\alpha=0$)

$$U_{sno} = \frac{\sqrt{2}}{n^2-1} U_{do} \quad (1)$$

b) dla $\alpha \neq 0$

$$U_{snf} = U_{sno} \sqrt{n^2 + \left(\frac{U_{d\alpha}}{U_{do}}\right)^2 (1-n)^2} \quad (2)$$

Prąd n-tej harmonicznej

$$J_{n\omega} = \frac{U_{n\omega}}{\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \quad (3)$$

Straty dodatkowe w uzwojeniach od wyższych harmonicznych

$$\Delta P_d = R_w I_{n\omega}^2 \quad (4)$$

Straty dodatkowe w obwodzie magnetycznym

$$\Delta P_{Fe} = B^2 f^{1,3} \text{const} \quad (5)$$

Zakładając liniowość charakterystyk magnesowania

$$B = f(I) = A I_w \quad (6)$$

a stąd

$$\Delta P_{Fe} = I_w^2 f w^{1,3} \text{const}' \quad (7)$$

Względne straty odniesiono do strat podstawowej (n=6) harmonicznej:

$$\frac{\Delta P_{Fe n}}{\Delta P_{Fe 6}} = \frac{J_{n\omega}^2 f^{1,3}}{J_{6\omega}^2 f^{1,3}} \quad (8)$$

Straty w stali powstają na skutek prądów wirowych oraz histerezy magnetycznej materiału.

$$\text{Straty od prądów wirowych} \quad P_{Bx} = \sigma_{Bx} \left(\frac{f}{100} \right)^2 B^2 \quad (9)$$

$$\text{Straty od histerezy} \quad P_h = \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right)^2 B^2 \quad (10)$$

Całkowite straty w stali

$$P_c = p_{[1/50]} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} B^2 G_c \quad ; \quad (11)$$

gdzie: G_c - masa całkowita elementu,

$p_{[1/50]}$ - stratność stali

$$p_{[1/50]} = p_h + p_{Bx} \quad (12)$$

Całkowite straty dla dowolnej częstotliwości oraz indukcyjności pola w elemencie o masie G_c opisuje zależność

$$P_c = p_{[1/50]} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} B^2 G_c \quad (13)$$

Praktyka wykazuje, że straty obliczone z powyższej zależności są mniejsze niż rzeczywiste i należy je pomnożyć przez współczynnik $k=4$, na podst. pozycji literatury [13].

Tak więc straty w żelazie

$$\Delta P_{Fe} = k p_c = k p_{(1/50)} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} B^2 G_c . \quad (14)$$

Straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia zasilanym prądem i napięciem stałym

$$\Delta P = R I_w^2 . \quad (15)$$

Powyższe oszacowanie strat dodatkowych wnoszonych przez wyższe harmoniczne prądu obwodu wzbudzenia wykazuje, że straty te nie będą powodowały dodatkowego nadmiernego nagrzewania maszyn w stopniu zagrażającym ich poprawnej pracy. Jest to powodowane dobrym wygładzeniem prądu w obwodzie wzbudzenia. Maszyny mogą więc pracować bez zmian w układzie ich chłodzenia.

4. OKREŚLENIE NASTAW REGULATORÓW UAR

Aby teoretycznie zbadać własności zmodernizowanego układu niezbędne jest stworzenie odpowiedniego modelu. Jedną z wielkości charakteryzujących własności dynamiczne układu jest transmitancja operatorowa $K(p)$.

Dla układów liniowych stacjonarnych transmitancja jest funkcją wymierną.

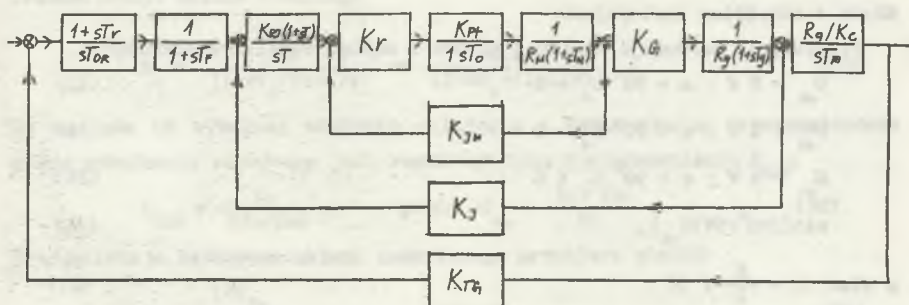
Aby można było wykorzystać metodę transmitancji operatorowych do doboru nastaw regulatorów poczyniono pewne uproszczenia, polegające na opisanie elementów nieliniowych członami liniowymi. Znając transmitancje elementów układu można stworzyć jego model, a badając odpowiedź na zadane wymuszenie określić można własności dynamiczne układu.

Na podstawie równań różniczkowych opisujących układ Leonarda zapisanych w postaci operatorowej otrzymano następujący schemat blokowy napędu (rys.9).

$$\text{Transmitancja prądnicy} \quad K_c = \frac{E}{J \omega_m} \quad (16)$$

$$\text{Transmitancja obwodu Leonarda} \quad \frac{1}{R_g (1+sT_g)} \quad (17)$$

$$\text{Transmitancja silnika} \quad \frac{R_g/K_e}{T_m s} \quad (18)$$



Rys. 9. Schemat blokowy napędu oraz układu sterowania i regulacji

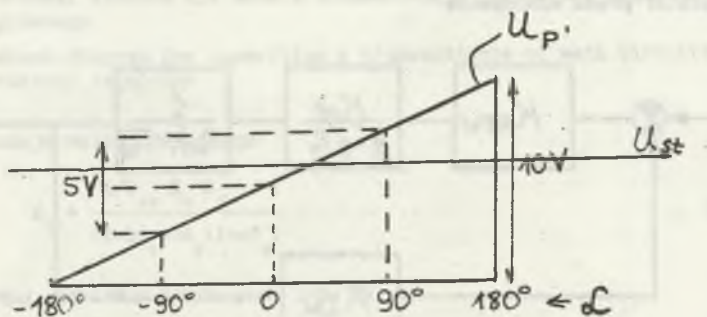
Fig. 9. Block diagram of drive and control system

Transmitancja obwodu wzbudzenia prądnic $\frac{1}{R_w(1+sT_w)}$ (19)

Transmitancja przekształtnika tyrystorowego $\frac{K_{pt}}{1+sT_0}$ (20)

gdzie $\tau_o = \frac{1}{2} \frac{1}{pf}$; $K_{pt} = \frac{dU_d}{dU_{st}} = \frac{d(U_{do} \cos\alpha)}{dU_{st}} = \frac{d(U_{do} \cos\alpha U_{st})}{dU_{st}}$ (21)

$K_{pt} = U_{do} c \sin\alpha U_{st}$ (22)



Rys. 10. Jeden okres napięcia piłowego porównywanego z napięciem sterującym

Fig. 10. The principle of comparison of control voltage U_{st} with ramp reference voltage U_p

Stałą c określimy następująco:

Przetwornik porównuje napięcie pilowe z napięciem stałym sterującym

$$U_{st} = 5 \text{ V} ; \alpha = 90^\circ \quad U_d = 0 \quad (23)$$

$$U_{st} < 5 \text{ V} ; \alpha < 90^\circ \quad U_d > 0 \quad (24)$$

$$U_{st} > 5 \text{ V} ; \alpha > 90^\circ \quad U_d < 0 \quad (25)$$

$$\sin[(90^\circ/5V)U_{st}] , \quad (26)$$

$$\text{a więc } c = \frac{\pi}{2} / 5V , \quad (27)$$

$$\text{czyli } K_{pt} = U_{do} \frac{\pi}{2} / 5V \sin\left(\frac{\pi}{2} / 5V U_{st}\right) . \quad (28)$$

$$\text{Transmitancja regulatora szybkości zmian prądu } \frac{1}{1+sT_F} \quad (29)$$

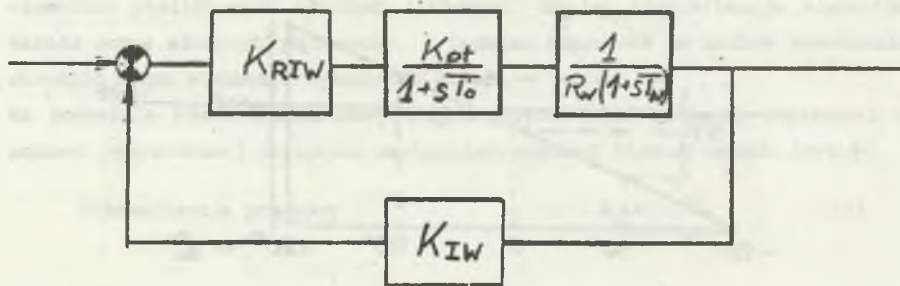
$$\text{Transmitancja sprzężenia prądu wzbudzenia } K_{Jw} = \frac{U_{st \max}}{J_{wn}} \quad (30)$$

$$\text{Transmitancja sprzężenia prądu głównego } K_J = \frac{U_{J \max}}{J_{\max}} \quad (31)$$

$$\text{Transmitancja sprzężenia prędkościowego } K_{TC} = \frac{U_{TC \max}}{n_{\max}} \quad (32)$$

Obliczenie nastaw regulatorów wg kryterium Kesslera - optimum modułu

a) Regulator prądu wzbudzenia



Rys.11. Schemat blokowy dla doboru transmitancji regulatora prądu wzbudzenia

Fig.11. Block diagram for asorting transmittance of excitation current regulator

Transmitancja układu otwartego

$$K_o = \frac{K_{pt} K_{Jw}}{R_w} = \frac{K_{ob}}{(1+s\tau_o)(1+sT_w)} \quad (33)$$

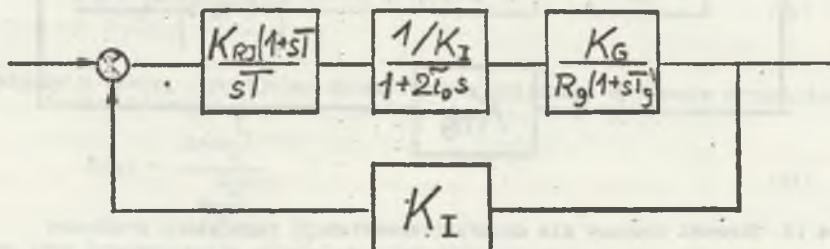
Ze względu na wymaganą szybkość działania i dopuszczalne przeregulowania prądu wzbudzenia stosowany jest regulator typu P o wzmacnieniu K_{RJW} :

$$K_{RJW} = \frac{T_w}{2\tau_o K_{ob}}, \quad \text{gdzie } K_{ob} = \frac{K_{pt} K_{Jw}}{R_w} \quad (34)$$

Transmitancja zastępcza układu zamkniętego przybiera postać:

$$G_z = \frac{1/K_{Jw}}{1+2\tau_o s} \quad (35)$$

b) Regulator prądu w obwodzie głównym Leonarda



Rys.12. Schemat blokowy dla doboru transmitancji regulatora prądu obwodu głównego

Fig.12. Block diagram for assorting a transmittance of main circuits current regulator

Transmitancja układu otwartego

$$K_o = \frac{1/K_{Jw} K_G K_J}{(1+2\tau_o s)R_g(1+sT_g)} \quad (36)$$

Zastosowany regulator prądu jest typu PI

$$G_{RJ} = \frac{K_{RJ}(1+sT)}{sT} \quad (37)$$

gdzie

$$K_{RJ} = \frac{T_g K_{Jw} R_g}{2(2\tau_o) K_J K_G}; \quad T=T_g \quad (38)$$

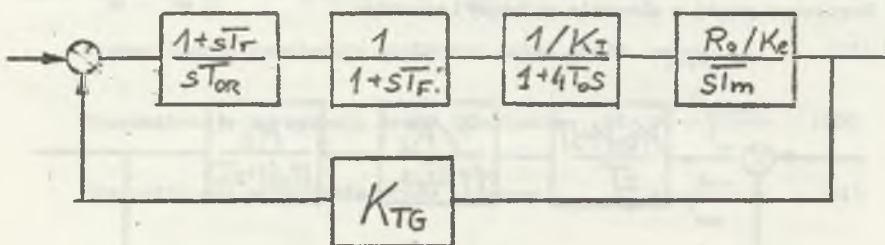
Transmitancja układu zamkniętego po przekształceniu:

$$G_z = \frac{1/K_J}{2(2\tau_o)^2 s^2 + 2(2\tau_o)s + 1} \quad (39)$$

Ze względu na to, że τ_o jest małe, można tę transmitancję uprościć i zastąpić równoważną dynamicznie transmitancją:

$$G_z = \frac{1/K_J}{2(2\tau_o)s + 1} \quad (40)$$

c) Obliczenie regulatora prędkości



Rys.13. Schemat blokowy dla doboru transmitancji regulatora prędkości

Fig.13. Block diagram for assorting a transmittance of speed regulator

Transmitancja układu otwartego:

$$K_o = \frac{1}{(1+sT_f)(1+4\tau_o s)} \frac{R_o/K_e}{T_m s} K_{TG} \quad (41)$$

$$K_{ob} = \frac{T K_{TG}}{K_o K_{I_f}} \quad (42)$$

$4\tau_o = \tau\mu$
 T_f } małe stałe czasowe,
 T - duża stała czasowa.

Transmitancja obiektu zawiera dwie małe i jedną dużą stałą czasową oraz jeden człon całkujący. Dobór transmitancji regulatora przeprowadzimy w oparciu o kryterium Kesslera - symetrycznego modułu.

Ogólna transmitancja regulatora

$$G_r(s) = \frac{(1+sT_r)^n}{sT_{oR}} \quad (43)$$

Transmitancja układu otwartego

$$G_o = \frac{K}{(1+sT_z)s^n \Pi_k} \frac{(1+sT_r)^n}{sT_{oR}} = \left(\frac{1+sT_r}{sT_r} \right)^n \frac{1}{sT_{oR}} \frac{(sT_r)^n K_o}{s^n \Pi_k} \frac{1}{1+sT_\Sigma} \quad (44)$$

Podstawiamy:

$$T_i = T_{oR} \frac{\Pi_k}{K_o T_r}, \quad (45)$$

$$G(s) = \left(\frac{1+s\frac{T_r}{n}}{sT_r} \right)^n \quad (46)$$

Rozwijamy w szereg i pomijając dalsze wyrazy obliczamy wyrażenie przybliżone

$$G(s) = \frac{1+s\frac{T_r}{n}}{s\frac{T_r}{n}} \quad (47)$$

Wobec tego transmitancja układu otwartego ma postać

$$G(s) = \frac{1+s\frac{T_r}{n}}{s\frac{T_r}{n}} \frac{1}{sT_i} \frac{1}{1+sT_\Sigma} \quad (48)$$

Transmitancja układu zamkniętego

$$G_z(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{1+s\frac{T_r}{n}}{1+\frac{T_r}{n} + s + s^2 \frac{T_r}{n} T_i + s^3 \frac{T_r}{n} T_i T_\Sigma} \quad (49)$$

Mianownik spełniający kryterium modułowe ma postać

$$1 + sT + s^2 \frac{T^2}{2} + s^3 \frac{T^3}{8}, \quad (50)$$

$$T_i = 2T_\Sigma = 2\tau_\mu = 2(4\tau_o) = 8\tau_o, \quad (51)$$

$$T_r = 2nT_i = 2(2\tau_\mu) = 4\tau_\mu. \quad (52)$$

Postać transmitancji regulatora prędkości PI

$$G_{Rn} = \frac{(1+sT_r)^n}{sT_{or}} = \frac{1+sT_r}{sT_{or}}, \quad (53)$$

gdzie

$$T_r = 4\Sigma\tau_\mu, \quad (54)$$

$$T_{or} = \frac{K_{ob} T_R}{T_k} T_1, \quad (55)$$

$$K_{ob} = \frac{K_{TC} R_g}{K_o K_I}, \quad (56)$$

$$T_1 = 2\tau_\mu = 2(4\tau_o). \quad (57)$$

5. PORÓWNANIE CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH SILNIKA W UKŁADZIE PRZED I PO MODERNIZACJI

W układzie przez modernizacją zastosowane były dwa sprzężenia zwrotne: prędkościowe ujemne oraz prądowe dodatnie. Usztywniały one charakterystykę mechaniczną silnika poprzez kompensowanie spadków napięcia w obwodzie głównym Leonarda.

$$n = \frac{E_G - I(R_G + R_M)}{K_o}. \quad (58)$$

Prędkość silnika prądu stałego "M" określa równanie (58)

$$E_G = \frac{E_W}{R_M} K_G, \quad (59)$$

SEM prądnicy prądu stałego określa równanie (59)

$$E_W = K_w(\theta_1 - \theta_n + \theta_p), \quad \text{- SEM wzbudnicy "W"} \quad (60)$$

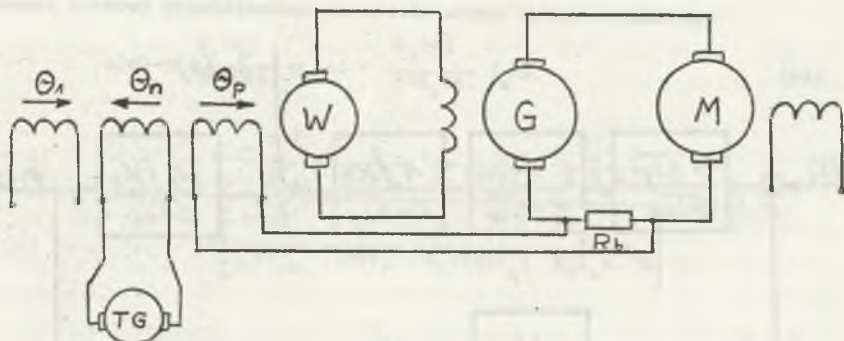
$$\theta_n = i_n z_n = \frac{E_{TC}}{\gamma_n} z_n = \frac{K_{TC} z_n E_M}{K_o \gamma_n} = \frac{K_{TC} z_n}{K_o \gamma_n} [E_G - I(R_M + R_G)] \quad (61)$$

Strumień od ujemnego sprzężenia prędkościowego opisuje wzór (61)

$$\theta_p = i_p z_p = \frac{\Delta U_b}{\gamma_p} z_p = \frac{z_p}{\gamma_p} R_b I, \quad (62)$$

θ_p - strumień od dodatniego sprzężenia prądowego ;

$$E_W = K_w \theta_1 + K_w \frac{z_p R_b}{\gamma_p} I - \frac{K_w K_{TC} z_n}{K_o \gamma_n} [E_G - I(R_G + R_M)], \quad (63)$$



Rys. 14. Układ Leonarda przed modernizacją

- dodatnie sprzężenie prądowe - θ_p
- ujemne sprzężenie prędkościowe - θ_n
- strumień wzbudzenia zadawany - θ_1

Fig. 14. Leonard's system before modernization

- positive current coupling
- negative speed coupling
- induction stream

Wzory (61) i (62) wstawiamy do (60) a następnie wzór (63) do wzoru (59) ;

$$E_G = \frac{K_G}{R_W} E_W = \frac{K_G K_W}{R_W} \theta_1 + \frac{K_G K_W z R_b}{R_W \gamma_p} I - \frac{K_G K_W K_{TC} z_n}{R_W n_e K_e} [E_G - I(R_M + R_G)], \quad (64)$$

Po przekształceniach mamy:

$$E_G \left(1 + \frac{K_G K_W K_{TC} z_n}{R_W \gamma_n} \right) = \frac{K_G K_W}{R_W} \theta_1 + I \left(\frac{K_G K_W z R_b}{R_W \gamma_n K_e} + \frac{K_G K_{TC} K_W z_n}{R_W K_e \gamma_n} R_M + R_G \right), \quad (65)$$

Ogólnie można zapisać:

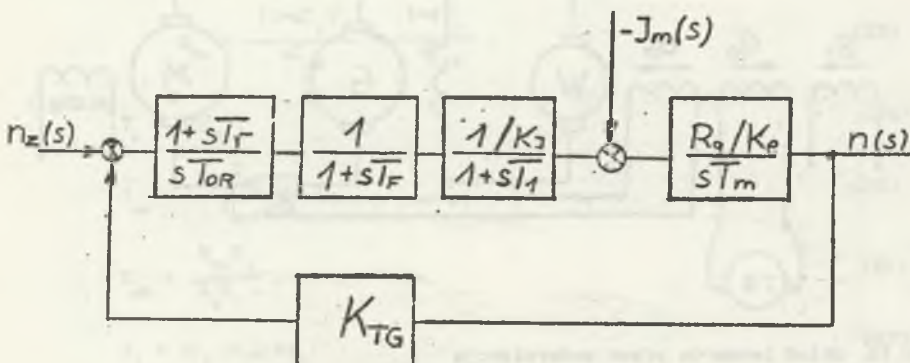
$$E_G \cdot B = E_{G0} + J \cdot A, \quad (66)$$

$$E_G = \frac{E_{G0} + IA}{B}, \quad (67)$$

Wstawiając równanie (67) do (58) mamy:

$$n = \frac{\frac{E_{G0}}{B} - I(R_M + R_G - \frac{A}{B})}{K_e}. \quad (68)$$

Z wyrażenia (68) wynika, że charakterystyka mechaniczna silnika w tym układzie jest bardziej sztywna niż w otwartym układzie Leonarda, ale nie osiąga idealnej sztywności.



Rys. 15. Schemat blokowy napędu w układzie Leonarda oraz układu sterowania, po modernizacji

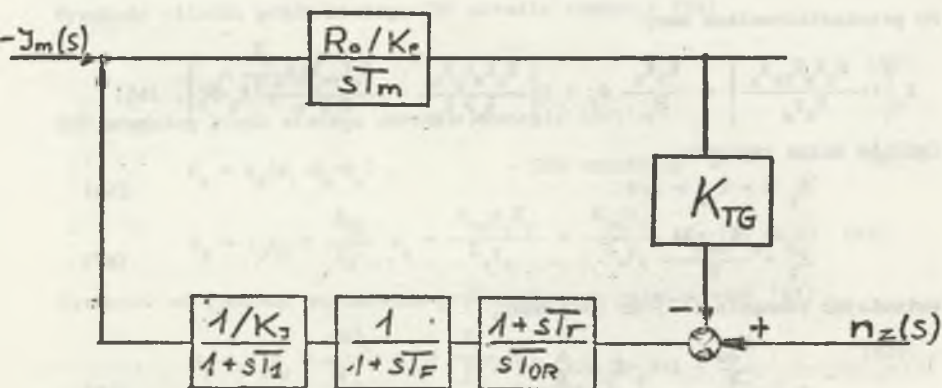
Fig. 15. Block diagram of drive in Leonard's system and of control system after modernization

Schemat projektowanego układu przedstawia rys. 15.

$n_z(s)$ - wartość zadana prędkości,

$n(s)$ - wielkość regulowana - prędkość silnika,

$-I(s)$ - zakłócenie - prąd obwodu głównego.



Rys. 16. Przekształcony schemat z rys. 14.

Fig. 16. Transformed diagram 14.

Schemat blokowy przedstawiony na rys.16 można opisać równaniem:

$$n(s) = \frac{K_1(s)}{1+K_o(s)} n_z(s) - \frac{K_2(s)}{1+K_o(s)} I_m(s) \quad (69)$$

$$n(s) = \frac{\frac{1+sT_r}{sT_{oR}} \frac{1}{(1+sT_f)} \frac{1}{K_I(1+sT_1)} \frac{R_g}{K_o T_m s}}{1 + \left[\frac{1+sT_r}{sT_{oR}} \frac{1}{1+sT_f} \frac{1}{K_I(1+sT_1)} \frac{R_g}{K_o T_m s} K_{TC} \right]} n_z(s) - \frac{\frac{R_g}{K_o T_m s} I(s)}{1 + \left[\frac{1+sT_r}{sT_{oR}} \frac{1}{1+sT_f} \frac{1}{K_I(1+sT_1)} \frac{R_g}{K_o T_m s} K_{TC} \right]} \quad (70)$$

Po przekształceniu równania mamy:

$$n(s) = \frac{(1+sT_r)R_g n_z(s)}{K_o sT_{oR} (1+sT_f)(1+sT_1)T_m s + \frac{R_g K_{TC}}{K_I K_o} (1+sT_r)} - \frac{R_g sT_{oR} (1+sT_f)(1+sT_1) I_m(s)}{K_o sT_{oR} (1+sT_f)(1+sT_1)T_m s + \frac{R_g K_{TC}}{K_I K_o} (1+sT_r)} \quad (71)$$

Dla stanów ustalonych można obliczyć granicę przebiegu czasowego przy $t \rightarrow \infty$ z twierdzenia o wartościach skrajnych

$$n_u = \lim_{t \rightarrow \infty} n(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s n(s)$$

Ponieważ

$$n_z(s) = \frac{n_z}{s} \quad (72)$$

$$I_m(s) = \frac{I_m}{s} \quad (73)$$

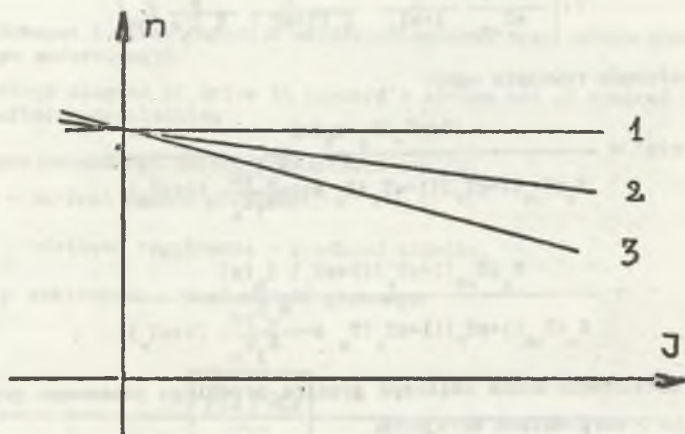
więc po podstawieniu równań (72) i (73) do wyrażenia (71) i obliczeniu granicy przy $s \rightarrow 0$ mamy:

$$n = \frac{K_I n_z}{K_{TC}} - \frac{0 \cdot I_m}{\frac{K_{TC}}{K_I}} = A n_z - 0 I_z$$

Z ostatniego równania widać, że prędkość nie zależy od prądu obwodu głównego, a co za tym idzie, charakterystyka mechaniczna silnika jest idealnie sztywna.

Dzięki modernizacji, oprócz polepszenia sztywności charakterystyki mechanicznej układu wyeliminowano z układu dodatnie sprzężenie prądowe, które może powodować niestabilność układu. W projekcie zastosowano tylko ujemne sprzężenie prądowe i prędkościowe.

Na podstawie doświadczeń Biura Projektów Górniczych w Gliwicach można stwierdzić, że charakterystyki mechaniczne silnika idealnie sztywne uzyskuje się w praktyce w budowanych układach opartych o regulatory typu PI lub PID.



Rys. 17. Charakterystyki mechaniczne napędu

- 1) Otwarty układ Leonarda
- 2) Napęd przed modernizacją
- 3) Napęd po modernizacji

Fig. 17. Mechanical characteristic of drive

- 1) opened Leonard's system
- 2) drive before modernization
- 3) drive after modernization

6. PODSUMOWANIE

- Przeprowadzenie modernizacji nie powinno zakłócić normalnego toku pracy szybu. Po przebudowie maszyna może realizować te same diagramy jazdy, jak i przed modernizacją.
- Zaproponowany układ automatycznej regulacji poprawi dynamikę napędu, co może być wykorzystane do skrócenia cyklu jazdy szybu i zwiększenia wydobywania.
- Układ został zaprojektowany z elementów typowych, krajowej produkcji, co ułatwi realizację i obniży koszty inwestycyjne.
- Zastąpienie wzbudnicy elektromaszynowej tyrystorową umożliwi osiągnięcie oszczędności energetycznych, co w dobie kryzysu energetycznego nie jest bez znaczenia.
- Dzięki zastosowaniu w UAR łączników bezstykowych w miejsce dotychczas działających styczników, wzrośnie niezawodność układu. Zmniejszone zostaną również nakłady na remonty i obsługę bieżącą wzbudnic.
- W zmodernizowanym układzie napędowym, dzięki zastosowaniu w UAR regulatorów typu PI można uzyskać lepszą sztywność charakterystyki mechanicznej. Zapewniają to ujemne sprzężenia zwrotne: prędkościowe i prądowe.

LITERATURA

- [1] Szklarski L.: Napędy elektryczne maszyn wyciągowych. Skrypt uczelniany AGH, Kraków 1987
- [2] Czajkowski A.: Napęd tyrystorowy prądu stałego. PWN, Warszawa 1984
- [3] Praca zbiorowa: Projektowanie przekształtników tyrystorowych. WNT, Warszawa 1974
- [4] Kuczewski Z.: Poradnik do projektowania elektrycznych układów napędowych. Skrypt uczelniany, Politechnika Śląska, Gliwice 1971
- [5] Kuczewski Z., Gogolewski Z.: Napęd elektryczny. WNT, Warszawa 1972

- [6] Karge A.: Nowoczesne urządzenia wyciągowe. Wyd. Śląsk, Katowice 1977
- [7] Kuczewski Z. i inni: Energoelektronika. Skrypt uczelniany, Politechnika Śląska, Gliwice 1977
- [8] Tunia H., Kazimierkowski M.: Podstawy automatyki napędu elektrycznego. PWN, Warszawa-Poznań 1983
- [9] Poradnik inżyniera elektryka. WNT, Warszawa 1974
- [10] Dokumentacja koncesyjna maszyny wyciągowej "Skoda".
- [11] Łaszcz J.: Automatyzacja napędu maszyn wyciągowych. Projekty-Problemy, Katowice 1973
- [12] Wasiliew A., Dinkiel G.: Programnoje ustrojstwo zadanijszch skorostiszczatnych podjemnych maszin. "Elektrotechnika - Energija" 10/79
- [13] Kostienko W., Piotrowskij A.: Elektriczeskije masziny. Moskwa 1957

Recenzent: Doc. dr inż. Józef Dancewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lipca 1990 r.

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Резюме

В статье рассмотрены возможности перестройки старых шахтных подъемных машин на базе тиристорных преобразователей. Представлен примерный проект модернизации подъемной машины работающей в системе T-D. Проект предполагает минимальную стоимость и самое короткое время ремонта. Применена перестройка цепей возбуждения генераторов и двигателя (система T-D). Также рассчитана новая система управления и регулирования. Представлен способ перехода от электрической схемы к блок-схеме и на основании этой схемы подобраны параметры регуляторов по критерию Кесслера. Сравнены характеристики системы до и после модернизации. Также оценены дополнительные потери в машинах постоянного тока, которые возникли из-за высших гармонических тока.

THE POSSIBILITIES OF MODERNIZATION OF MINING WINDING-MACHINES WITH
APPLICATION OF THYRISTOR CONVERTERS

S u m m a r y

This paper considers the possibilities of rebuilding old winding-machines, on the base of the thyristor converters. The model project of modernization of winding-machines working in Leonard's system is presented. This project plans the minimum cost and the shortest time of repair. Rebuilding of excitation circuits of generators and Leonard's engines excitation circuits is applied; besides a new control system is designed. An author presents a way of turning from the real diagram to the block one and then using only this vicarious diagram, he assort's regulators' settings according Kessler's criterion. He compares characteristics of the system before and after modernization and evaluates the stray losses in direct current machines following the appearance of higher current harmonics in excitation.