

WIESŁAW GABRYŚ

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

UWAGI O STRUKTURZE I WŁASNOŚCIACH REGULACYJNYCH UKŁADÓW
PRZEKŁADNI ELEKTRYCZNYCH DLA LOKOMOTYW SPALINOWYCH

Streszczenie: W pracy porównano kilka wybranych systemów wzbudzenia prądnicy głównej z punktu widzenia statycznych własności regulacyjnych przekładni elektrycznych lokomotyw spalinowych. W oparciu o wprowadzone kryterium porównawcze oraz schematy strukturalne układów zlinearyzowanych prądu stałego sformułowano ogólne wskazania, ułatwiające wstępny dobór obwodów sprzężeń zwrotnych dla stabilizacji prędkości obrotowej silnika spalinowego.

1. Wstęp

Przekładnia elektryczna lokomotywy spalinowej stanowi układ analogiczny do Łączni Leonarda w napędach przemysłowych. Istotne różnice z punktu widzenia własności regulacyjnych wpływają stąd, że

a) w przekładni elektrycznej prądnica jest napędzana silnikiem spalinowym o bardzo stromo opadającej charakterystyce mechanicznej $n_G = f(M_{sp})$, a więc pracuje przy zmiennej prędkości obrotowej n_G ;

b) silniki trakcyjne są szerokie.

Obie okoliczności decydują o nieliniowości układu, co znacznie utrudnia jego analizę, jak i syntezę.

W pracy ograniczono się do rozpatrywania własności regulacyjnych przekładni elektrycznej przy dowolnie zadanym nastawieniu dźwigni paliwowej silnika spalinowego, co jest równoznaczne z potraktowaniem momentu na wale tego silnika jako jednego z niezależnych sygnałów wejściowych do układu regulacji. Można wtedy przyjmować, że silnik spalinowy rozwija moment M_{EP} o stałej wartości niezależnej od zmian prędkości obrotowej n_G .

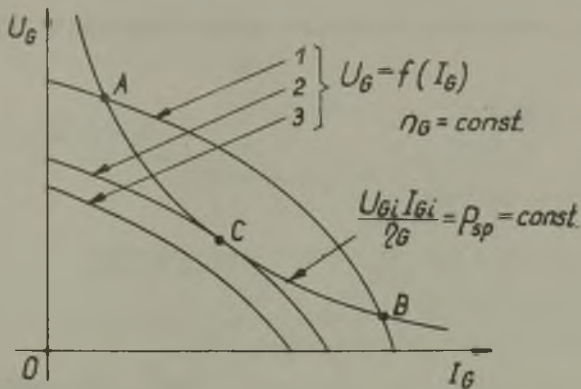
2. Zadania układu regulacyjnego

Ze względu na małą przeciążalność silnika spalinowego głównym zadaniem przekładni elektrycznej jest takie ukształtowanie charakterystyki zewnętrznej prądnicy $U_G = f(I_G)$, by zapewnić możliwie stały pobór mocy na wale w pewnych z góry określonych przedziałach obciążeń i prędkości lokomotyw. Wynika stąd, że wymagany przebieg charakterystyki zewnętrznej prądnicy w układzie współrzędnych (U_G, I_G) jest zbliżony do hiperboli równobocznej, zwanej "hiperbolą stałej mocy".

Układ regulacji powinien więc realizować wystarczające intensywne rozmagnesowywanie prądnicy głównej w funkcji obciążenia. Można to osiągnąć bądź to poprzez wykorzystanie naturalnych wewnętrznych sprzężeń zwrotnych (np. oddziaływanie twornika prądnicy synchronicznej), bądź też stosując odpowiednio dobrane obwody sprzężeń zewnętrznych podług niektórych sygnałów wyjściowych układu. Wejściami do których wprowadzamy zarówno sygnały zadające, jak i wyjściowe są w rozpatrywanych układach uzwojenia wzbudzające prądnicy głównej, czy też wzbudnicy lub kaskady wzbudnic.

Charakterystyczny dla większości stosowanych w praktyce systemów rozmagnesowywania jest - pomijawszy układy specjalne omówione dalej - wypukły kształt charakterystyki zewnętrznej $U_G = f(I_G)$, co wynika wprost z przebiegu krzywej magnesowania

prądnicy głównej lub kaskady "prądnica - wzbudnica". Stąd też możliwe są trzy rodzaje wzajemnego usytuowania obu charakterystyk pokazane na rys. 1.



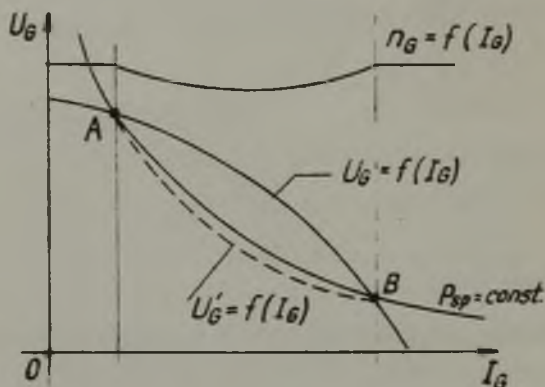
Rys. 1. Wzajemne usytuowanie charakterystyk zewnętrznych prądnicy i hiperboli stałej mocy

W przypadku 2 i 3 (rys. 1) moc trakcyjna silnika spalinowego P_{sp} jest niewykorzystana w całym zakresie obciążeń z wyjątkiem punktu styczności C. Dlatego też w praktyce przyjmuje się usytuowanie 1 przy którym w obszarze pracy pomiędzy punktami przecięcia A i B ma miejsce przeciążenie silnika spalinowego, co z kolei - przy danym niezmiennym nastawieniu dźwigni paliwowej - powoduje spadek prędkości obrotowej n_G .

W obu zakresach na zewnątrz punktów A i B silnik jest niedociążony i pracuje ze stałą prędkością obrotową określoną przez nastawienie mechanicznego regulatora prędkości, a więc charakterystyka pracy prądnicy pokrywa się tu z jej charakterystyką zewnętrzną (przy $n_G = \text{const}$).

W przedziale obciążeń pomiędzy punktami równowagi A i B charakterystyka pracy prądnicy $U'_G = f(I_G)$ leży nie tylko poniżej charakterystyki zewnętrznej $U_G = f(I_G)$ lecz także - ze wzglę-

du na spadek prędkości silnika spalinowego - poniżej hiperboli stałej mocy (rys. 2 - krzywa przerywana), przy czym praca na tej charakterystyce jest możliwa pod warunkiem, że przy obniżaniu się prędkości n_G moc na wale silnika spalinowego maleje wolniej, niż moc pobierana przez prądnicę (rys. 3).



Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna i charakterystyka pracy prądnicy

Można to wyrazić przy pomocy następujących nierówności:

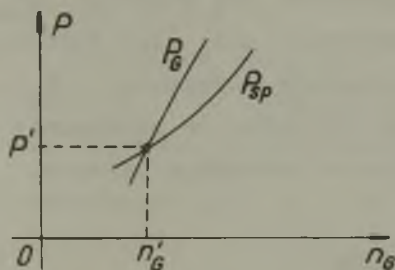
$$\frac{\partial P_G}{\partial n_G} > \frac{\partial P_{sp}}{\partial n_G} \quad (1a)$$

lub

$$\frac{\partial M_G}{\partial n_G} > \frac{\partial M_{sp}}{\partial n_G} \quad (1b)$$

Ponieważ prędkość obrotowa n_G jest wspólna dla prądnicy i silnika, więc obie nierówności reprezentują dwie postacie tego samego warunku i w praktyce winny być spełnione w dostatecznie dużym otoczeniu punktu przecięcia obu charakterystyk (rys. 3).

Należy przy tym podkreślić, że podczas pracy ustalonej prąd pobierany przez silniki trakcyjne jest jednoznacznie określony przez siłę pociągową lokomotywy, równą oporom ruchu.



Rys. 3. Warunek stabilizacji statycznej zespołu "silnik spalinowy-prądnica"

W związku z tym bardzo często, np. przy analizowaniu jazdy na dłuższych i większych wzniesieniach można dla uproszczenia pomijać zależność oporu ruchu od prędkości i przyjmować $F = \text{const}$ oraz $I_G = \text{const}$. Nierówności (1a,b) można wtedy przepisać w postaci:

$$I_G \frac{\partial U_G}{\partial n_G} > \frac{\partial P_{sp}}{\partial n_G} \quad (2a)$$

$$C'_{MG} I_G \frac{\partial \phi_G}{\partial n_G} > \frac{\partial M_{sp}}{\partial n_G} \quad (2b)$$

Im silniejsze są powyższe nierówności, przy tym mniejszym spadku prędkości Δn_G otrzymuje się ustalony punkt pracy dla danego wymuszenia prądowego I_G .

Dochodzimy w ten sposób do sformułowania podstawowego kryterium statycznej dobroci układu regulacyjnego ze względu na prawidłową pracę silnika spalinowego:

- należy traktować jako najkorzystniejszy ten układ, w którym określonym przyrostowi SEM prądnicy ΔE_G odpowiada najmniejszy przyrost prędkości Δn_G (lub odwrotnie: dla zadanego $\Delta n_G = \text{const}$ otrzymujemy największy ΔE_G).

Zastosowanie tego kryterium do porównania wybranych układów prądu stałego omówiono w następnym punkcie.

3. Układy prądu stałego

Jakkolwiek układy prądu stałego należą do tradycyjnych rozwiązań przekładni elektrycznej, są one stosowane nadal w lokomotywach średnich i dużych mocy, przy czym z powodzeniem konkurują z przekładniami hydraulicznymi budowanymi przez szereg wytwórni na terenie całego świata.

Na rys. 4 pokazano schemat zasadniczy układu regulowanego przy pomocy wzbudnicy czterozwojeniowej (W) i prądnicy tachometrycznej (TG). Wzbudnica magnesowana jest działającymi zgodnie przepływami: sterującym (θ_{st}), bocznikowym (θ_b) i tachometrycznym (θ_n) oraz przeciwnie działającym przepływem szeregowym (θ_{sz}). Przyjęto, że prądnica (G) zasila jeden silnik trakcyjny (M), co nie ma wpływu na wyniki rozważań ($I_G = I$).

Sygnalami wejściowymi do układu są: napięcie sterujące U_{st} , moment silnika spalinowego M_{sp} oraz moment oporów ruchu M_m , a sygnalami wyjściowymi odpowiednio: prędkość n i moment M silnika trakcyjnego oraz prędkość n_G i moment M_G prądnicy. W dalszych rozważaniach prędkość n_G będzie traktowana jako wielkość regulowana.

Uzwojenia wzbudnicy o liczbach zwojów z_n , z_b , z_{sz} stanowią wejścia dla sygnałów sprzężeń zwrotnych. Obwody tych sprzężeń

można również zrealizować bez pośrednictwa wzbudnicy, wyposażając prądnicę główną w kilka uzwojeń wzbudzających, co ma miejsce zwykle w układach mniejszych mocy.

W realnych wykonaniach z reguły nie wykorzystuje się wszystkich sprzężeń, pokazanych na rys. 4.

Na przykład przy pominięciu sprzężenia tachometrycznego ($\theta_n = 0$) i napięciowego ($\theta_b = 0$) otrzymujemy tzw. system "Lemp", a spośród układów bez wzbudnicy należy wymienić:

- prosty układ przeciwwzbudny przy $\theta_n = 0$ i $\theta_b = 0$,
- układ z prądnicą trójuzwojeniową przy $\theta_n = 0$,
- układ "Gebus" przy $\theta_{st} = 0$, $\theta_n = 0$ i zgodnie magnesujących θ_b i θ_{sz} .

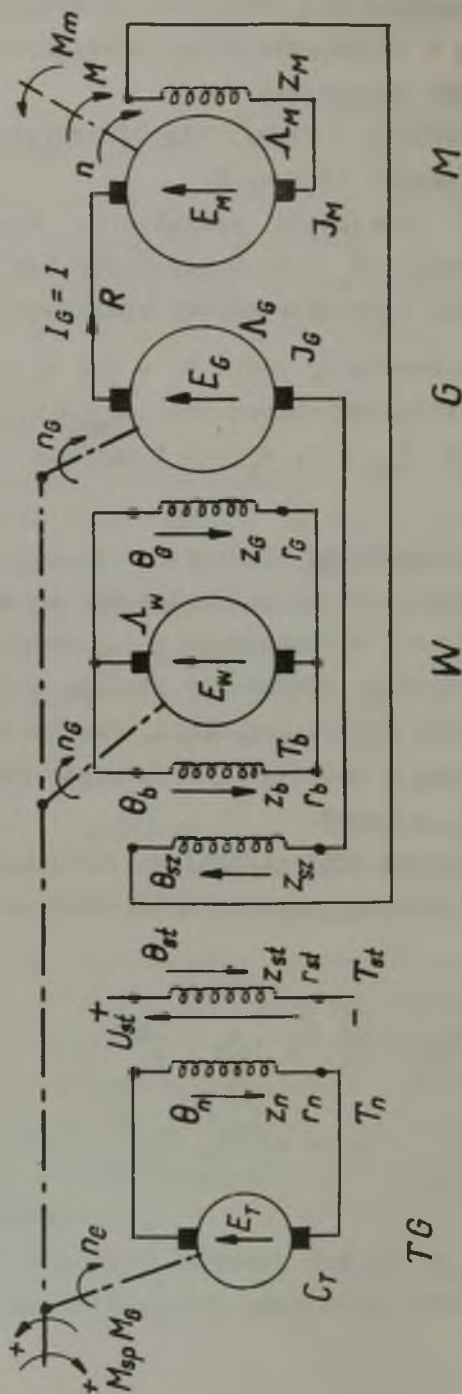
Dla porównania statycznych właściwości regulacyjnych wybranych układów z różnymi kombinacjami sprzężeń zwrotnych zastosujemy kryterium dobroci sformułowane w poprzednim punkcie.

W charakterze przykładu pierwszego zbadamy wpływ sprzężenia napięciowego na dobroć układu regulacji, porównując układ z prądnicą 3-uzwojeniową z prostym układem przeciwwzbudnym przy stałym obciążeniu $I_G = \text{const}$.

Dla układu z prądnicą trójuzwojeniową otrzymujemy, zakładając prostoliniowość krzywej magnesowania, następujące zależności:

$$\theta_G = \theta_{st} - \theta_{sz} + \frac{z_b}{r_b} E_G = \theta_c + \frac{z_b}{r_b} E_G \quad (3)$$

$$E_G = k_G \theta_G n_G \quad (4)$$



Rys. 4. Ideowy schemat przekładni elektrycznej prądu stałego

Po podstawieniu (3) do (4) i przekształceniu dochodzimy do zależności $n_G = f(E_G)$ przy $I_G = \text{const.}$

$$n_G = \frac{E_G}{k_G \Theta_c + k_G \frac{z_b}{r_b} E_G} \quad (5)$$

Różniczkując (5) podług E_G i zastępując różniczki dn_b i dE_b przyrostami skończonymi otrzymujemy wzór umożliwiający zastosowanie rozważanego kryterium:

$$\Delta n_G = \frac{1}{k_G \Theta_c \left(1 + \frac{z_b}{r_b \Theta_c} E_G\right)^2} \Delta E_G \quad (6)$$

przy czym oznaczają:

$\Theta_c = \Theta_{st} - \Theta_{sz}$ - przepływ stały z założenia

k_G - współczynnik proporcjonalności

z_b, r_b - liczba zwojów i oporność uzwojenia bocznikowego prądnicy.

Podstawiając do (6) $z_b = 0$ (lub $r_b = \infty$) dostajemy wzór porównawczy dla prostego układu przeciwwzbudnego:

$$\Delta n'_G = \frac{1}{k_G \Theta_c} \Delta E_G \quad (7)$$

Porównując (6) i (7) stwierdzamy $\Delta n'_G > \Delta n_G$ co przemawia na korzyść układu z prądnicą trójzwojową. Do analogicznego wniosku doszlibyśmy uzmienniając prąd I_G (przy tej samej liczbie z_{sz} w obu układach) i przyjmując nieliniową krzywą magnesowania prądnicy.

Jako przykład drugi niech posłuży układ "Lemp", którego porównanie z prostym układem przeciwwzbudnym pozwoli ocenić wpływ wzbudnicy na stabilizację prędkości n_G . Z zależności wyjściowych $E_G = k_G \Theta_G n_G$; $E_W = k_W \Theta_W n_G$; $\Theta_W = \Theta_{st} - \Theta_{sz} = \text{const.}$ oraz $\Theta_G = \frac{z_G}{r_G} E_W$

otrzymujemy:
$$E_G = k_G k_W \frac{z_G}{r_G} \Theta_W n_G^2 \quad (8)$$

i odpowiednio dla przyrostów

$$\Delta E_G = 2 k_G k_W \frac{z_G}{r_G} \Theta_W n_G \Delta n_G \quad (9)$$

Mamy zatem $\Delta E_G = k_1 n_G \Delta n_G$, podczas gdy prostym w układzie przeciwwzbudnym $\Delta E_G' = k_2 \Delta n_G$, a więc przy $k_1 \gg k_2$ jest $\Delta E_G' < \Delta E_G$ (w realnych układach jest oczywiście $k_1 \gg k_2$).

Wynika stąd, że zastosowanie wzbudnicy zasilanej z wału silnika spalinowego wyraźnie poprawia warunki stabilizacji prędkości n_G .

Efekt dalszego uczulenia układu na zmiany prędkości silnika spalinowego można - idąc tą drogą - osiągnąć, wprowadzając do systemu wzbudzania prądnicy kaskadę wzbudnic lub wielostopniowy wzmacniacz elektromaszynowy (np.: przy wzbudzeniu amplitudowym otrzymujemy $E_G = k n_G^3$ oraz $\Delta E_G = 3 k n_G^2 \Delta n_G$).

W celu dokładniejszego zbadania roli i charakteru poszczególnych sprzężeń (np.: dodatnie czy ujemne, według wielkości regulowanej, czy też kompensacyjne według wymuszenia) oraz celowości doboru konkretnej kombinacji tych sprzężeń wskazane jest sporządzenie i analiza schematu strukturalnego analogicznego, jak dla układów liniowych. Schemat taki można stosować w analizie uproszczonej dla przypadku małych przyrostów sygnałów wej-

ściowych, co w zupełności odpowiada warunkom realnej pracy napędów trakcyjnych (stopniowe niewielkie zmiany M_{sp} , Θ_{st} , M_m).

W charakterze przykładu przeanalizujemy strukturę układu ze sprzężeniem tachometrycznym, które jest obecnie coraz częściej stosowane nie tylko w przekładniach prądu stałego, lecz również w nowoczesnych przekładniach typu "prąd przemienny - prąd stały". Ideowy schemat układu zrealizowanego przy zastosowaniu prądnicy dwuuzwojeniowej otrzymamy, pomijając na rys. 4 wzbudnicę wraz z uzwojeniami z_{sz} , z_b , z_G (uzwojenia z_{st} i z_n wzbudzają bezpośrednio prądnicę). Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 4 można napisać wyjściowy układ równań różniczkowych, jak poniżej:

$$T_{\Sigma} \frac{d\Theta_G}{dt} + \Theta_G = \frac{z_{st}}{r_{st}} U_{st} + C_T \frac{z_n}{r_n} n_G \quad 10.1$$

$$E_G = k'_{EG} \wedge_G \Theta_G n_G \quad 10.2$$

$$E_M = k'_{EM} \wedge_M z_M I_n \quad 10.3$$

$$M_G = k'_{MG} \wedge_G \Theta_G I \quad 10.4$$

$$M = k'_{MM} \wedge_M z_M I^2 \quad 10.5$$

$$M - M_n = \frac{J_M}{9,55} \frac{dn}{dt} \quad 10.6$$

$$M_{sp} - M_G = \frac{J_G}{9,55} \frac{dn_G}{dt} \quad 10.7$$

} (10)

Oznaczenia w równaniach układu (10) nie wyszczególnione na rys. 4:

$T_{\Sigma} = T_{st} + T_n$ - suma elektromagnetycznych stałych czasowych uzwojeń wzbudzających prądnicy,

J_G, J_M - zastępcze momenty bezwładności odpowiednio na wale prądnicy i silnika trakcyjnego,

C_T - stała tachoprądnicy ($E_T = C_T n_G$),

\wedge_{G}, \wedge_M - zastępcze przewodności magnetyczne prądnicy i silnika (stałe w założeniu nienasyconego obwodu magnetycznego),

$k'_{EG}, k'_{EM}, k'_{MG}, k'_{MM}$ - współczynniki proporcjonalności dla SEM twornika i momentu - odpowiednio prądnicy i silnika trakcyjnego (według ogólnych zależności $E = k'_E \Phi n = k'_E \wedge \theta n$; $M = k'_M \Phi I = k'_M \wedge \theta I$),

$\theta_G = \theta_{st} + \theta_n$ - wypadkowy przepływ magnesujący prądnicy.

Przechodząc na równania małych przyrostów (linearyzacja metodą stycznych) otrzymujemy - po dokonaniu transformacji IC i uporządkowaniu - liniowy układ równań operatorowych, stanowiący podstawę schematu strukturalnego:

$$\Delta \theta_G(p) = \frac{1}{T_{\Sigma} p + 1} \left[\frac{z_{st}}{r_{st}} \Delta U_{st}(p) + C_T \frac{z_n}{r_n} \Delta n_G(p) \right] \quad 11.1$$

$$\Delta E_G(p) = k_{EGn} \Delta \theta_G(p) + k_{EG\theta} \Delta n_G(p) \quad 11.2$$

$$\Delta E_M(p) = k_{EMI} \Delta n(p) + k_{EMn} \Delta I(p) \quad 11.3$$

$$\Delta M_G(p) = k_{MG\theta} \Delta I(p) + k_{MGI} \Delta \theta_G(p) \quad 11.4$$

$$\Delta M(p) = k_{IM} \Delta I(p) \quad 11.5$$

$$\Delta n(p) = \frac{9,55}{J_M P} [\Delta M(p) - \Delta M_m(p)] \quad 11.6$$

$$\Delta n_G(p) = \frac{9,55}{J_G P} [\Delta M_{sp}(p) - \Delta M_G(p)] \quad 11.7$$

(11)

Współczynniki k w układzie równań (11) są pochodnymi cząstkowymi odpowiednich wielkości w wybranym punkcie pracy "x" stanowiącym początek rozpatrywanego przedziału linearyzacji, a mianowicie:

$$k_{EGn} = \left(\frac{\partial E_G}{\partial n} \right)_x = k'_{EG} \wedge_G n_{Gx}$$

$$k_{EMl} = \left(\frac{\partial E_M}{\partial n} \right)_x = k'_{EM} \wedge_M z_M I_x$$

$$k_{EG\theta} = \left(\frac{\partial E_G}{\partial \theta} \right)_x = k'_{EG} \wedge_G \theta_{Gx}$$

$$k_{EMn} = \left(\frac{\partial E_M}{\partial I} \right)_x = k'_{EM} \wedge_M z_M n_x$$

$$k_{MG\theta} = \left(\frac{\partial M_G}{\partial I} \right)_x = k'_{MG} \wedge_G \theta_{Gx}$$

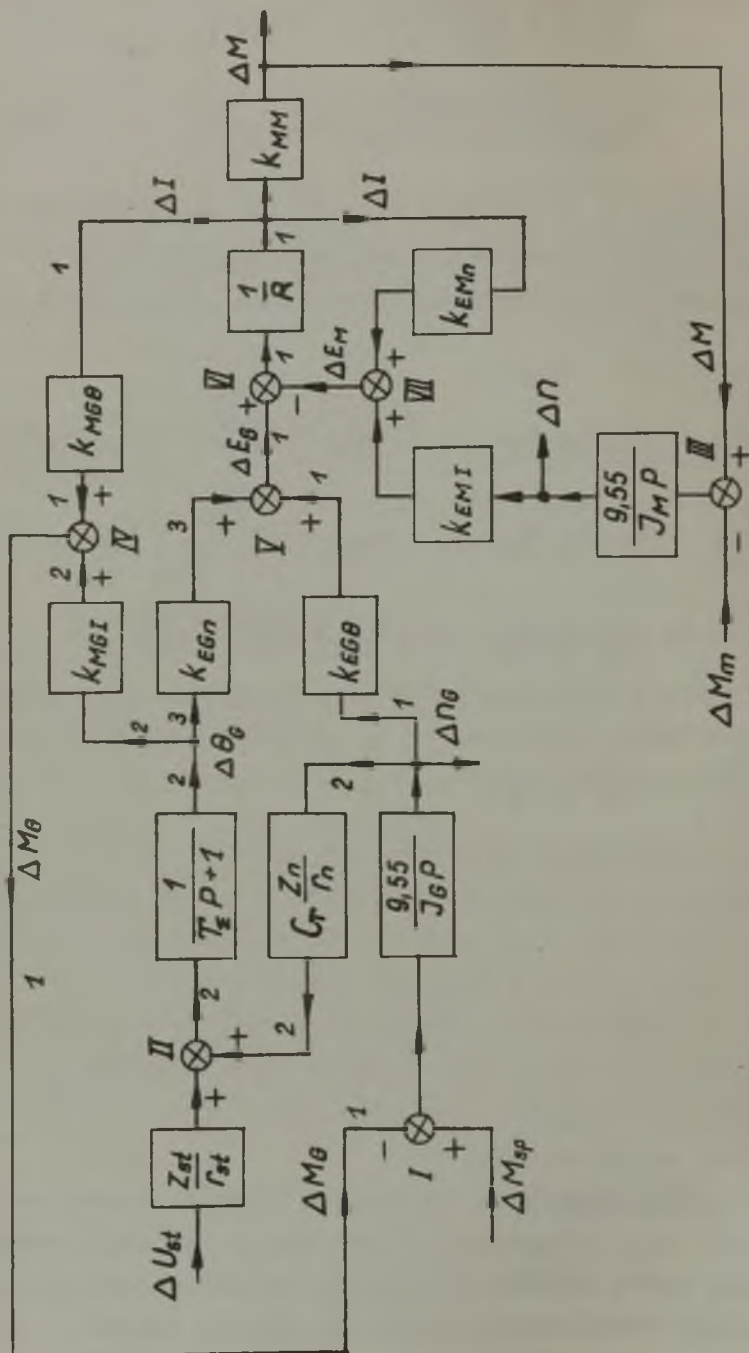
$$k_{MM} = \left(\frac{\partial M}{\partial I} \right)_x = \left(\frac{dM}{dI} \right)_x =$$

$$= 2 k'_{MM} \wedge_M z_M I_x$$

$$k_{MGI} = \left(\frac{\partial M_G}{\partial \theta} \right)_x = k'_{MG} \wedge_G I_x$$

Schemat strukturalny odpowiadający układowi równań (11) pokazano na rys. 5. Schemat ten po sprowadzeniu do postaci jednoobwodowej może służyć jako podstawa do liniowej analizy własności dynamicznych układu w zakresie małych odchyżeń sygnałów wokół wybranego punktu pracy, natomiast w oparciu o formę wieloobwodową przedstawioną na rys. 5 można zidentyfikować tory ujemnych sprzężeń zwrotnych, stabilizujących prędkość n_G zespołu "silnik spalinowy-prądnica".

Punktem początkowym tych torów jest węzeł zaczepowy na wejściu sygnału Δn_G , a punktem końcowym wejściowy węzeł sumacyjny oznaczony cyfrą rzymską I. Widzimy, że układ otwarty posiada "naturalne" (wewnętrzne) ujemne sprzężenie zwrotne podług



Rys. 5. Schemat strukturalny układu z ujemnym sprzężeniem prędkościowym podług n_G

prędkości n_G , którego tor oznaczono liczbą "1" (rys. 5). Skuteczność działania tego sprzężenia można zwiększyć, stosując np. kaskadowe wzbudzenie prądnicy, jak to sformułowano poprzednio (powiększamy współczynnik k_{EG}). Wprowadzając do układu zewnętrzne sprzężenie tachometryczne umożliwimy przepływ i wzmocnienie sygnałów zwrotnych dodatkowymi torami "2" i "3" i w rezultacie polepszenie efektu stabilizacji prędkości n_G .

W analogiczny sposób można rozpatrywać strukturę dowolnego systemu wzbudzania prądnicy. Postępowanie takie ułatwia w znacznym stopniu wstępny dobór obwodów sprzężeń zwrotnych stabilizujących prędkość obrotową n_G , a tym samym i moc wydawaną przez silnik spalinowy (przy stałym wtrysku paliwa jest $M_{sp} \approx \text{const}$).

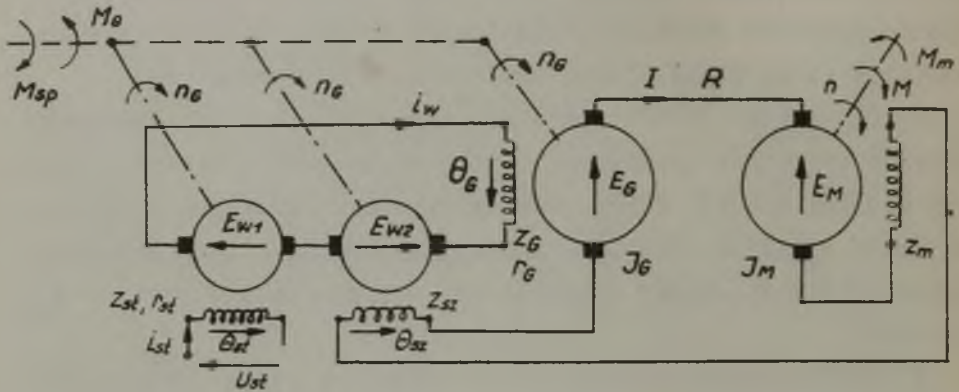
Z drugiej strony należy zwrócić uwagę na pewną jednostronność i niekompletność wyników uzyskiwanych na podstawie analizowania schematów strukturalnych układów nieliniowych. Wynika to stąd, że rozpatrywane schematy odpowiadają układom zlinearyzowanym i są aktualne dla małych przyrostów sygnałów, podczas gdy układy rzeczywiste są nieliniowe. W związku z tym układy o analogicznej lub identycznej strukturze mogą niekiedy mieć odmienne właściwości regulacyjne, zarówno statyczne jak i dynamiczne.

Dla przykładu porównamy układ "Lemp" (rys. 4 przy pominięciu z_n i z_b) z układem dwuwzbudnicowym pokazanym na rys. 6. Zaletą tego ostatniego jest możliwość uzyskania wklęsłej charakterystyki zewnętrznej prądnicy, której przepływ magnesujący Θ_G jest w stanie ustalonym proporcjonalny do różnicy SEM obu wzbudnic

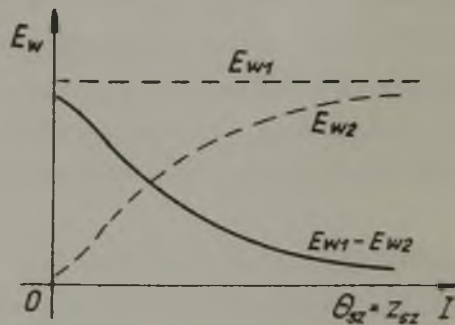
$$\Theta_G = \frac{z_G}{r_G} (E_{w1} - E_{w2}) \quad (12)$$

przy czym $E_{w1} = \text{const}$, a $E_{w2} = f_1(I)$.

Ostatecznie zależność $E_{w1} - E_{w2} = f_2(I)$ ma kształt odwróconej krzywej magnesowania wzbudnicy drugiej (rys. 7). Identyczny przebieg będzie mieć SEM $E_G = f(I)$ prądnicy o nienasyconym obwodzie magnetycznym.



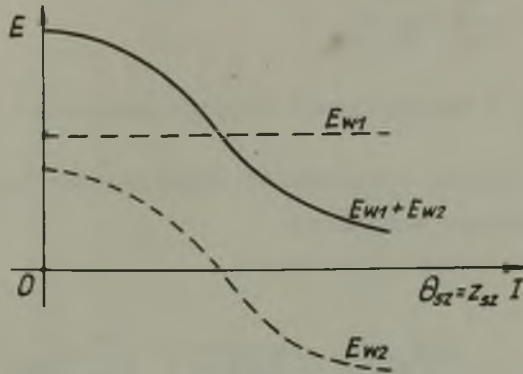
Rys. 6. Ideowy schemat przekładni dwuwzbudnicowej



Rys. 7. Charakterystyka zewnętrzna układu z rys. 6

Podobny efekt można również osiągnąć przy zgodnym działaniu E_{w1} i E_{w2} pod warunkiem, że wzbudnica "2", spolaryzowana dodatkowym przepływem stałym, pracuje na dodatniej i ujemnej części krzywej magnesowania (rys. 8), bądź też przy zastosowaniu jednej tylko wzbudnicy o budowie specjalnej (z rozszcze

pionymi biegunami lub dwiema parami biegunów o różnych przekrojach [2], [3]).



Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna układu dwuwzbudnicowego przy zgodnym działaniu E_{w1} i E_{w2}

W celu sporządzenia schematów strukturalnych obu porównywalnych układów wystarczy wypisać równania dla obwodów wzbudzenia prądnicy. Zgodnie z oznaczeniami na rys. 4 i 6 otrzymujemy:

- dla układu "Lemp":

$$\Delta \theta_{st}(p) = \frac{1}{T_{st}p + 1} \left[\frac{z_{st}}{r_{st}} \Delta U_{st}(p) + z_{sz} T_{st} p \Delta I(p) \right] \quad (13)$$

$$\Delta \theta_G(p) = \frac{1}{T_G p + 1} \left[(k_{w\theta} - k_{wI}) \Delta n_G(p) + k_{wn} \Delta \theta_{st}(p) - z_{sz} k_{wn} \Delta I(p) \right] \quad (14)$$

przy czym:

$$k_{w\theta} = \frac{z_G}{r_G} k'_w \Lambda_w \theta_{st_x}$$

$$k_{wI} = \frac{z_G}{r_G} k'_w \Lambda_w I_x$$

$$k_{w\theta} - k_{wI} = \frac{z_G}{r_G} \left(\frac{\partial E_w}{\partial n_G} \right)_x$$

$$k_{wn} = \frac{z_G}{r_G} \left(\frac{\partial E_w}{\partial \theta_{st}} \right)_x = \frac{z_G}{r_G} k'_w \Lambda_w n_{Gx}$$

$$z_{sz} k_{wn} = \frac{z_G}{r_G} \left(\frac{\partial E_w}{\partial I} \right)_x$$

$$k'_w = \frac{E_w}{\Phi_w n_G} - \text{współczynnik proporcjonalności}$$

Λ_w - zastępcza przewodność magnetyczna obwodu strumienia głównego wzbudnicy,

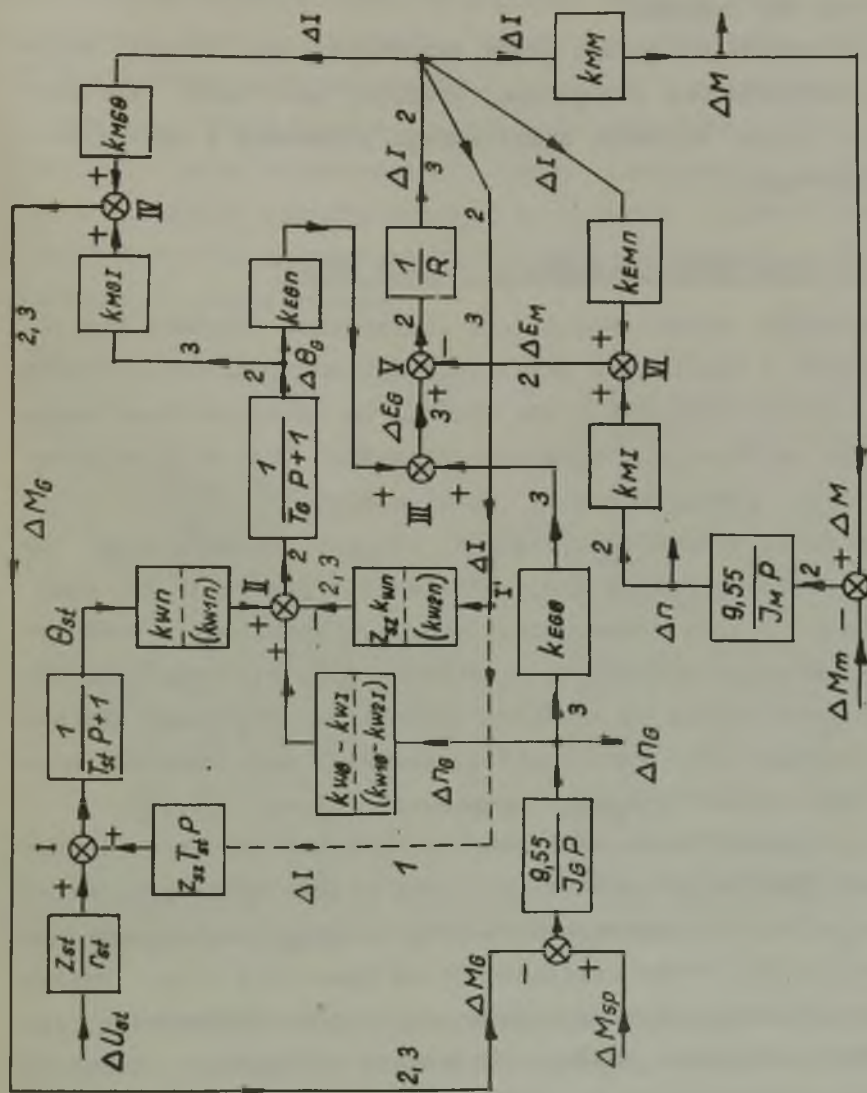
- dla układu dwuwzbudnicowego:

$$\Delta \theta_{st}(p) = \frac{1}{T_{st} p + 1} \frac{z_{st}}{r_{st}} \Delta U_{st}(p) \quad (15)$$

$$\Delta \theta_G(p) = \frac{1}{T_G p + 1} \left[(k_{w1\theta} - k_{w2I}) \Delta n_G(p) + k_{w1n} \Delta \theta_{st}(p) - k_{w2n} \Delta I(p) \right] \quad (16)$$

gdzie współczynniki $k_{w1\theta}$, k_{w2I} , k_{w1n} - k_{w2n} mają analogiczną budowę jak poprzednio, tylko odnoszą się zgodnie z indeksami "1" i "2" odpowiednio do wzbudnicy pierwszej lub drugiej.

Pozostałe równania są dla obu wariantów wzbudzenia identyczne, jak równania (11.2) do (11.7) układu równań (11), w związku z czym i schematy strukturalne będą prawie jednakowe. Przedstawiono je zatem - z uwzględnieniem różnic w oznaczeniach na wspólnym rys. 9 z którego wynika, że struktura układu "Lamp" różni się od struktury układu dwuwzbudnicowego jednym tylko torem (oznaczonym liczbą 1) różniczkującego dodatniego sprzężenia zwrotnego (od węzła zaczepowego I' do węzła sumacyjnego I). Sprzężenie to nie ma wpływu na przebieg charakterystyk statycz-



Rys. 9. Porównawczy schemat strukturalny dla układu "Lemp" i przekładni dwuwzbudnicowej

nych, a tylko pogarsza - w praktyce zazwyczaj nieznacznie - właściwości dynamiczne układu, zwiększając skłonność do przeregulowań, czy też kołysań.

W rzeczywistości natomiast układ dwuwzбудnicowy, dzięki wklęsłej charakterystyce zewnętrznej prądniccy jest dużo korzystniejszy z punktu widzenia stabilizacji prędkości i mocy silnika spalinowego.

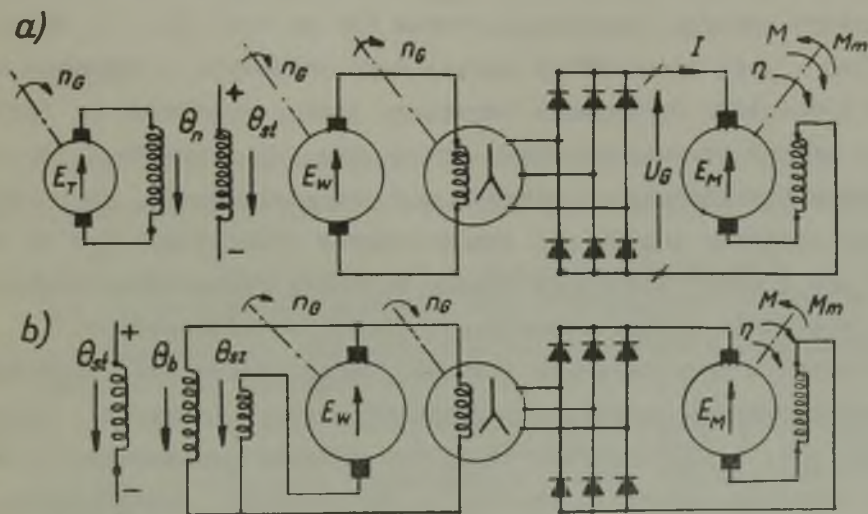
4. Układy typu "prąd przemienny - prąd stały"

W ostatnich latach przekładnie elektryczne wyposaża się coraz częściej w trójfazową prądnicę synchroniczną, zasilającą szeregowo silniki trakcyjne prądu stałego za pośrednictwem układu mostkowego prostowników półprzewodnikowych. Jest to więc przekładnia typu "prąd przemienny - prąd stały" [5], [6], [7]. Do głównych zalet nowego układu należy zaliczyć niemały zysk na ciężarze prądniccy (około 25%), możliwość dopasowania jej mocy znamionowej do mocy nowoczesnych silników spalinowych oraz wyraźne zwiększenie sprawności przekładni [5], [6]. Spośród korzyści pochodnych można by wymienić ułatwienie unifikacji prądnic na lokomotywach oraz wykorzystanie nadwyżki mocy zespołu prądotwórczego do elektrycznego ogrzewania pojazdu [5], [6].

Jako przykłady kombinacji obwodów sprzężeń zwrotnych w przekładniach typu "prąd przemienny - prąd stały" można przytoczyć układy regulacyjne zastosowane w nowoczesnych lokomotywach francuskich [5], [6], które uwidocznił na rys. 10 a i b. Wynika stąd, że struktura układów regulacyjnych jest analogiczna jak w przekładniach prądu stałego. Działanie sprzężenia tachometrycznego w układzie na rys. 10 a jest identyczne jak w przeanalizowanym układzie według rys. 4 (schemat strukturalny rys. 5).

Podobny efekt stabilizacji mocy silnika spalinowego uzyskano, stosując zgodne bocznikowanie wzbudnicy w schemacie na rys. 10b. W obu przypadkach nie wprowadzono uzwojenia rozmagnesowa-

jącego wzbudnicę w funkcji prądu głównego ze względu na wystarczająco silną reakcję twornika prądnicy synchronicznej (niekiedy konieczne jest tu stosowanie dodatniego sprzężenia prądowego). Dzięki uzwojeniu szeregowemu wzbudnicy w układzie na rys. 10b stworzono obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego w celu niezależnienia prądu wzbudzenia od zmian temperatury uzwojenia magnesów prądnicy synchronicznej (w przypadku izolacji klasy H oporność w stanie pełnego nagrzania może być większa o 70% od odporności w stanie zimnym).



Rys. 10. Przykłady obwodów sprzężeń zwrotnych w układach regulacyjnych przekładni "prąd przemienny - prąd stały": a) ze sprzężeniem tachometrycznym, b) ze wzbudnicą trójuzwojeniową

Analizę i wyniki badań doświadczalnych układu regulacyjnego przekładni typu "prąd przemienny - prąd stały" wykonanych na układzie modelowym w laboratorium zespołu eksploatacji i automatyzacji układów elektromechanicznych Katedry Elektrotechniki Przemysłowej przedstawiono w osobnej pracy [8].

5. Wnioski

W oparciu o rozważania oraz schematy strukturalne przedstawione w p. 3 można sformułować praktyczne zalecenia odnośnie wstępnego wyboru zestawu sprzężeń zwrotnych w układach regulacyjnych przekładni elektrycznych, a mianowicie:

a) Rozmagnesowujące uzwojenie szeregowo. Działanie tego uzwojenia ma dwojaki charakter. Z jednej strony jest to sprzężenie kompensacyjne w sensie usuwania wpływu obciążenia silnika trakcyjnego na spadek prędkości n_G (regulacja według zaburzenia - przepływ sygnału kompensacji torem "2" na rys. 9). Z drugiej strony - jako niepożądany skutek tego przepływu - powstaje obwód dodatniego sprzężenia zwrotnego podług prędkości n_G (przepływ sygnału zwrotnego torem "3" na rys. 9). Sprzężenie to utrudnia stabilizację prędkości silnika spalinowego, przy działaniu zakłóceń innych niż moment oporów trakcyjnych M_m . A zatem już z samej struktury układu wynikają pewne ograniczenia dla wielkości rozmagnesowującego przepływu szeregowego. Podstawowym ograniczeniem jest tu jednak utrzymanie przebiegu charakterystyki zewnętrznej prądnicy powyżej hiperboli stałej mocy, tak, by wykorzystać pełną moc silnika spalinowego w całym wymaganym zakresie regulacji. Skuteczność kompensującego działania tego przepływu - bez powiększania wzmocnienia w obwodzie pasożytniczego sprzężenia dodatniego - można wydatnie poprawić, zabezpieczając wklęsły kształt charakterystyki zewnętrznej prądnicy (rys. 7, 8),

b) Ujemne sprzężenie zwrotne według prędkości silnika spalinowego. Układ posiada "naturalne" wewnętrzne sprzężenie zwrotne (ujemne) podług prędkości n_G , którego działanie można wzmocnić bądź to poprzez stosowanie kaskadowego wzbudzania prądnicy przy użyciu wzmacniaczy elektromaszynowych zasilanych z wał silnika spalinowego, bądź też wprowadzając do układu dodat-

kowe ujemne sprzężenie obrotowe (wzbudzenie prądnicy przepływem proporcjonalnym do n_G , magnesującym zgodnie z przepływem sterującym Θ_{st} - rys. 4). Podobny efekt daje zgodne bocznikowanie prądnicy lub wzbudnicy. Sprzężenia zwrotne podług prędkości - realizujące regulację według błędu - powinny być możliwie silne. Ograniczenia dla współczynników wzmocnienia w obwodach tych sprzężeń wynikają z warunków stabilności dynamicznej.

LITERATURA

- [1] Podoski J.: Trakcja spalinowo-elektryczna, WKiŁ, W-wa 1963r.
- [2] Sobolewski H.: Trakcja elektryczna, spalinowa i parowa, WPW, W-wa 1963.
- [3] Bołdow N.A., Stiepanow A.D.: Tiejpłoelektriczieskij podwiżnyj sostaw (osnowy teorii), Izd. "Transport, Moskwa 1968.
- [4] Krajcberg M.I.: Elektropriwod pri awtonomnom istocznie e-nergii. Izd. "Energia" Moskwa 1966.
- [5] Dziuba Wł.: Zastosowanie prądu przemiennego w lokomotywach spalinowych. Przegląd kolej. Elektrot., 1969 nr 5 (także: Sympozjum "Problemy nowoczesnej trakcji elektrycznej", AGH, Kraków, październik 1968 r.).
- [6] Machefer - Tassin M.: Lokomotywy spalinowe o przekładni prądu zmiennego, "Dni elektrotechniki francuskiej w Polsce", W-wa, czerwiec 1968 r.
- [7] Nouvion M.: "Nouvelle transmission diesel-electrique" - Sympozjum na temat trakcji elektrycznej, PAN, Komitet Elektrot., W-wa listopad 1963 r.
- [8] Kałuża E.: Analiza i badania laboratoryjnego układu przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały".
- [9] Knapke A.: Dieselelektrischer Lokomotivenantrieb mit Drehstrom - Gleichstromübertragung, XIII Internationales Wissenschaftlichen Kolloquium Heft 2, Elektromotorische Antriebe, Technische Hochschule Ilmenau, 22/26 Oktober 1968.

ЗАМЕЧАНИЯ О СТРУКТУРЕ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ ТЕПЛОВЗОВ

Р е з ю м е

В труде сопоставляется несколько избранных систем возбуждения главного генератора с точки зрения статических регулировочных свойств электропередач тепловозов.

На базе введенного сравнительного критерия и структурных схем линеаризованных систем постоянного тока приводится формулировка общих указаний, которые дают возможность предварительно подобрать цепи обратной связи для стабилизации скорости вращения двигателя внутреннего сгорания.

REMARKS ABOUT BLOCK DIAGRAMS AND REGULATING PROPERTIES OF ELECTRIC TRANSMISSION SYSTEMS FOR DIESEL LOCOMOTIVES

S u m m a r y

In this work some selected excitation systems of main generator were compared from the point of view of statical regulating properties of electric transmissions for diesel locomotives. On a base of the established comparative criterion and block diagrams of d.c. linearized systems, the general instructions were formulated, which make easier the preliminary selection of feed-back circuits for stabilization of diesel engine rotational speed.