

EUGENIUSZ KALUŻA

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

ANALIZA I BADANIA LABORATORYJNEGO UKŁADU PRZEKŁADNI
ELEKTRYCZNEJ TYPU "PRĄD PRZEMIENNY - PRĄD STAŁY"

Streszczenie. Aktualne tendencje w rozwoju lokomotyw spalinowych z przekładnią elektryczną idą w kierunku coraz szerszego stosowania przekładni typu "prąd przemienny - prąd stały". Powyższy czynnik zdecydował o wyborze kierunku badań prowadzonych w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach na laboratoryjnym układzie przekładni elektrycznej zestawionej z silnika wysokoprężnego prądnicy 3 fazowej synchronicznej wraz ze wzbudnicami, mostkowego układu prostownikowego i szeregowego silnika trakcyjnego. Moc przenoszona przez przekładnię może dochodzić do 40 KM przy zakresie regulacji $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \approx 2$. W ramach dotychczas prze-

prowadzonych prac uzyskano uproszczony opis matematyczny zamkniętego układu przekładni typu "prąd przemienny - prąd stały" oraz wyniki porównawcze pomiarów laboratoryjnych charakterystyk statycznych i dynamicznych układu otwartego i kilku wybranych wariantów układu zamkniętego. Sformułowano wnioski odnośnie programu dalszych badań.

1. Wstęp

Występujący od szeregu lat stały wzrost mocy lokomotyw trakcji kolejowej związany jest z koniecznością przewożenia ciężkich pociągów z coraz większymi prędkościami jazdy.

Powyższa okoliczność skłoniła konstruktorów lokomotyw spalinowych do stosowania wysokoobrotowych silników spalinowych dużej mocy przy jednoczesnym unowocześnieniu przekładni elektrycznej, polegającym na zastąpieniu prądnicy głównej prądu stałego wielofazową prądnicą prądu przemiennego zasilającą poprzez układ prostownikowy szeregowo silniki trakcyjne prądu stałego. Cały szereg zalet wyżej wymienionej przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały" [2] powoduje powstawanie tendencji do zastosowania jej również w lokomotywach spalinowych mniejszych mocy. Można się spodziewać, że w dalszej przyszłości znajdzie także szersze zastosowanie przekładnia elektryczna prądu przemiennego z trakcyjnymi silnikami asynchronicznymi i statycznymi przetwornicami częstotliwości. Dotyczy to przede wszystkim rozwiązań, w których silnikami napędowymi będą turbiny spalinowe. Zastosowanie przekładni elektrycznej prądu przemiennego w aktualnie zbudowanych lokomotywach ogranicza się do nielicznych przypadków, mających raczej charakter eksperymentalny. Można by to wytłumaczyć:

- po pierwsze niechęcią do wprowadzania skomplikowanych przetwornic częstotliwości z obwodem pośredniczącym prądu stałego, dopasowanych do istniejących synchronicznych prądnic trakcyjnych niskich częstotliwości,
- po drugie dążność, wynikająca ze względów ekonomicznych do ujednolicenia wózków wraz z szeregowymi silnikami trakcyjnymi prądu stałego w lokomotywach sieciowych i spalinowych z przekładnią elektryczną.

Na podstawie powyższych okoliczności można wysunąć tezę, że najbardziej aktualne badania na obecnym etapie rozwoju przekładni elektrycznych powinny iść w kierunku konstruowania i doskonalenia przekładni typu "prąd przemienny - prąd stały".

Badania prowadzone w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach nad przekładnią elektryczną typu "prąd przemienny - prąd stały" postanowiono realizować w oparciu o stosunkowo duży model laboratoryjny, na którym można uzyskiwać przenoszenie mocy rzędu 40 KM przy zakresie regulacji prądu $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \approx 2$. Należy przypuszczać, że wyniki badań skonfrontowane z doświadczeniami przeprowadzanymi na modelu tej mocy będą miarodajne w odniesieniu do rozwiązań stosowanych w realnych lokomotywach spalinowych. Badania na modelu laboratoryjnym umożliwią również sporządzenie i zweryfikowanie uproszczonego schematu analogowego rozpatrywanej przekładni elektrycznej, co pozwoli na znaczne rozszerzenie i przyspieszenie doświadczeń mających na celu uzyskanie optymalnego układu regulacyjnego.

2. Analiza teoretyczna

2.1. Równania opisujące układ przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały" ze wzbudnicą wielouzwojową

Rozpatrywany schemat układu uwidocznił na rys. 1. W rozważaniach teoretycznych zastosowano linearyzację układu dla małych przyrostów tj. rozpatrywano przyrosty wielkości wejściowych i wyjściowych wokół punktów równowagi układu (w stanie ustalonym). Parametry układu opisujące badany punkt równowagi układu oznaczono indeksem y np. I_y , n_{0y} . Oznaczenia wielkości w równaniach są zgodne z oznaczeniami na rys. 1.

2.1.1. Obwody wzbudzenia wzbudnicy 3 uzwojeniowej.

Przyrost strumienia wzbudnicy

$$\Delta\Phi_w = \Phi_w - \Phi_{wy} = \frac{\partial\Phi_w}{\partial\theta_w} (z_1 \Delta i_1 + z_2 \Delta i_2 + z_3 \Delta I - \frac{\partial\theta_r}{\partial i_w} \Delta i_w) \quad (1)$$

Przyrosty prądów w uzwojeniach wzbudnicy określono z równań

$$\Delta U_1 = \Delta i_1 R_1 + 2 p_w \sigma_1 z_1 \frac{d\Delta\Phi_w}{dt} \quad (2)$$

$$\Delta U_2 = \Delta i_2 R_2 + 2 p_w \sigma_2 z_2 \frac{d\Delta\Phi_w}{dt} \quad (3)$$

gdzie:

Φ_w - strumień wzbudnicy w stanie przejściowym

Φ_{wy} - jw. lecz w stanie ustalonym

$\frac{\partial\Phi_w}{\partial\theta_w} = a_w$ - nachylenie stycznej do charakterystyki magnesowania wyznaczone dla przepływu Θ_{wy}

$\frac{\partial\theta_r}{\partial i_w} = a_r$ - współczynnik uwzględniający reakcję twornika wzbudnicy.

σ , z - współczynnik rozproszenia oraz ilość zwojów danego uzwojenia przypadająca na 1 biegun wzbudnicy

p_w - liczba par biegunów wzbudnicy.

Wstawiając przyrosty prądów Δi_1 , Δi_2 określone z równań (2) i (3) do równania (1) oraz zastępując bezwzględne wartości przyrostów niżej zestawionymi przyrostami względnymi odniesionymi do wartości znamionowych:

$$\bar{\Phi}_w = \frac{\Delta\Phi_w}{\Phi_{wn}}, \quad \bar{I} = \frac{\Delta I}{I_n}, \quad \bar{U}_1 = \frac{\Delta U_1}{U_{1n}}, \quad \bar{U}_2 = \frac{\Delta U_2}{U_{2n}}$$

otrzymamy po przejściu na formę operatorową następujące równanie opisujące wzbudzenie wzbudnicy 3 uzwojeniowej.

$$(T_{ww}p + 1) \bar{\Phi}_w = k_{1ww} \bar{U}_1 + k_{2ww} \bar{U}_2 + k_{3ww} \bar{I} - k_{4ww} \bar{i}_w \quad (4)$$

gdzie

$$T_{ww} = \frac{2a_w p_w \sigma_1 z_1^2}{R_1} + \frac{2a_w p_w \sigma_2 z_2^2}{R_2}$$

$$k_{1ww} = \frac{a_w z_1 U_{1n}}{R_1 \Phi_{wn}}, \quad k_{2ww} = \frac{a_w z_2 U_{2n}}{R_2 \Phi_{wn}}, \quad k_{3ww} = \frac{a_w z_3 I_n}{\Phi_{wn}}$$

$$k_{4ww} = \frac{a_w a_r i_{wn}}{\Phi_{wn}}$$

2.1.2. Obwód wzbudzenia prądnicy synchronicznej

$$\Delta U_w = R_w \Delta i_w + L_w \frac{d \Delta i_w}{dt} - M_z \frac{d \Delta I}{dt} \quad (5)$$

$$U_w = E_w \frac{R_w}{R_w + R_{tw}} = E_w \alpha_w \quad (6)$$

$$E_w = c_w n_Q \Phi_w \quad (7)$$

$$\Delta E_w = c_w n_{Qy} \Delta \Phi_w + c_w \Phi_{wy} \Delta n_Q \quad (8)$$

gdzie:

M_z - przeliczeniowa indukcyjność wzajemna.

Po wprowadzeniu względnych wartości przyrostów do równań (5) i (8) $\bar{i}_w = \frac{\Delta i_w}{i_{wn}}$, $\bar{n}_0 = \frac{\Delta n_0}{n_0}$ oraz rozwiązaniu ich względem \bar{i}_w

otrzymamy równanie opisujące obwód wzbudzenia prądnicy synchronicznej zasilającej poprzez układ prostownikowy silnik trakcyjny

$$(T_{w1} p + 1)\bar{i}_w = k_{1w} \bar{\Phi}_w + k_{2w} \bar{n}_0 + T_{w2} p \bar{I} \quad (9)$$

gdzie:

$$T_{w1} = \frac{L_w}{R_w}, \quad k_{1w} = \frac{\alpha_w c_w n_{0y} \Phi_{wn}}{R_w i_{wn}}, \quad k_{2w} = \frac{\alpha_w c_w \Phi_{wy} n_{0n}}{R_w i_{wn}}$$

$$T_{w2} = \frac{M_z I_n}{R_w i_{wn}}$$

2.1.3. Obwód główny

W równaniach opisujących obwód główny twornik prądnicy synchronicznej traktowano łącznie z mostkowym układem prostownikowym jako jeden element.

Napięcie biegu jałowego mierzone na wyjściu układu prostownikowego

$$U_o = U_{oy} + \frac{\partial U_o}{\partial n_0} \Delta n_0 + \frac{\partial U_o}{\partial i_w} \Delta i_w \quad (10)$$

Suma napięć w obwodzie głównym

$$U_o = E_M + R_M I + L_g \frac{dI}{dt} + U_k \quad (11)$$

Spadek napięcia w uzwojeniach stojana prądnicy synchronicznej, w układzie prostownikowym oraz reakcję twornika ujęto równaniem

$$U_k = U_{ky} + \frac{\partial U_k}{\partial n_0} \Delta n_0 + \frac{\partial U_k}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial U_k}{\partial i_w} \Delta i_w \quad (12)$$

SEM silnika trakcyjnego (M)

$$E_M = E_{My} + \Delta E_M = E_{My} + C_M \bar{\Phi}_{My} \Delta n_M + C_M n_{My} \Delta \bar{\Phi}_M \quad (13)$$

W równaniach (10) do (13) zastosowano następujące oznaczenia:

$I = I_y + \Delta I$ - prąd wyprostowany w obwodzie głównym (prąd obciążenia silnika trakcyjnego)

L_g - indukcyjność obwodu głównego wyznaczonego dla parametrów I_y , i_{wy} i $n_{\partial y}$ w rozpatrywanym punkcie pracy

R_M - oporność silnika trakcyjnego wraz z przewodami łączeniowymi.

W stanie ustalonym mamy:

$$U_{oy} = E_{My} + R_M I_y + U_{ky} \quad (14)$$

Po podstawieniu zależności (10), (12), (13) i (14) do równania (11) i przejścia na względne wartości przyrostów otrzymamy równanie operatorowe dla obwodu głównego przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały"

$$(T_g p + 1) \bar{I} = k_{1g} \bar{i}_w + k_{2g} \bar{n}_\partial - k_{3g} \bar{n}_M - k_{4g} \bar{\Phi}_M \quad (15)$$

gdzie:

$$T_g = \frac{L_g}{R_M + \frac{\partial U_k}{\partial I}}, \quad k_{1g} = \frac{\left(\frac{\partial U_o}{\partial i_w} - \frac{\partial U_k}{\partial i_w}\right) i_{wn}}{\left(R_M + \frac{\partial U_k}{\partial I}\right) I_n}$$

$$k_{2g} = \frac{\left(\frac{\partial U_o}{\partial n_\partial} - \frac{\partial U_k}{\partial n_\partial}\right) n_{\partial n}}{\left(R_M + \frac{\partial U_k}{\partial I}\right) I_n}, \quad k_{3g} = \frac{C_M \bar{\Phi}_{My} n_{Mn}}{\left(R_M + \frac{\partial U_k}{\partial I}\right) I_n}, \quad k_{4g} = \frac{C_M n_{My} \bar{\Phi}_{Mn}}{\left(R_M + \frac{\partial U_k}{\partial I}\right) I_n}$$

2.1.4. Silnik trakcyjny z obciążeniem

Równanie momentów

$$\frac{J_M}{9,55} \frac{dn_M}{dt} = M_M - M_m \quad (16)$$

Moment obciążenia

$$M_m = M_{my} + \Delta M_m + \Delta M_{m1} = M_{my} + \frac{\partial M_m}{\partial n_M} \Delta n_M + \Delta M_{m1} \quad (17)$$

Moment rozwijany przez silnik trakcyjny

$$M_M = M_{My} + \Delta M_M = M_{My} + \frac{\partial M_M}{\partial I} \Delta I \quad (18)$$

gdzie:

J_M - moment bezwładności wirnika silnika trakcyjnego wraz z obciążeniem mechanicznym

ΔM_m - przyrost momentu obciążenia wyznaczony dla danego prądu wzbudzenia (I_{wH}) i oporu obciążenia hamulca elektrycznego (R_H) (poczrowane opory jazdy zależne od prędkości pojazdu)

ΔM_{m1} - przyrost momentu obciążenia wywołany działaniem hamulcy mechanicznego (poczrowana zmiana profilu trasy).

W stanie ustalonym mamy:

$$M_{My} = M_{my} \quad (19)$$

Wprowadzając do równań (17) i (18) wartości względne przyrostów momentu obciążenia \bar{M}_m i prędkości obrotowej silnika trakcyjnego \bar{n}_M oraz podstawiając zależności (17), (18) i (19) do (16) otrzymamy:

$$(T_M p + 1) \bar{n}_M = k_{1M} \bar{I} - k_{2M} \bar{M}_{m1} \quad (20)$$

gdzie:

$$T_M = \frac{J_M}{9,55 \frac{\partial M_M}{\partial n_M}}, \quad k_{1M} = \frac{\frac{\partial M_M}{\partial I} I_n}{\frac{\partial M_M}{\partial n_M} n_{Mn}}, \quad k_{2M} = \frac{M_{Mn}}{\frac{\partial M_M}{\partial n_M} n_{Mn}}$$

2.1.5. Zespół prądotwórczy (diesel-prądnica)

Równanie wyjściowe opisujące pracę zespołu

$$\frac{J_Q}{9,55} \frac{dn_Q}{dt} = M_Q - M_G \quad (21)$$

Moment obrotowy silnika diesla

$$M_Q = M_{Qy} + \frac{\partial M_Q}{\partial n_Q} \Delta n_Q + \frac{\partial M_Q}{\partial X} \Delta X \quad (22)$$

Moment obciążenia rozwijany przez prądnicę synchroniczną oraz zespołu maszyn pomocniczych

$$M_G = M_{Gy} + \frac{\partial M_G}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial M_G}{\partial i_w} \Delta i_w + \frac{\partial M_G}{\partial n_Q} \Delta n_Q \quad (23)$$

W powyższych równaniach oznaczają:

J_Q - moment bezwładności elementów wirujących zespołu prądotwórczego

X - położenie dźwigni paliwowej silnika diesla.

W stanie ustalonym

$$M_{Qy} = M_{Gy} \quad (24)$$

W wyniku przeliczeń otrzymamy ostateczną postać równania opisującego pracę zespołu prądotwórczego

$$(T_Q p + N) \bar{n}_Q = k_x \bar{X} - k_{1Q} \bar{I} - k_{2Q} \bar{i}_w \quad (25)$$

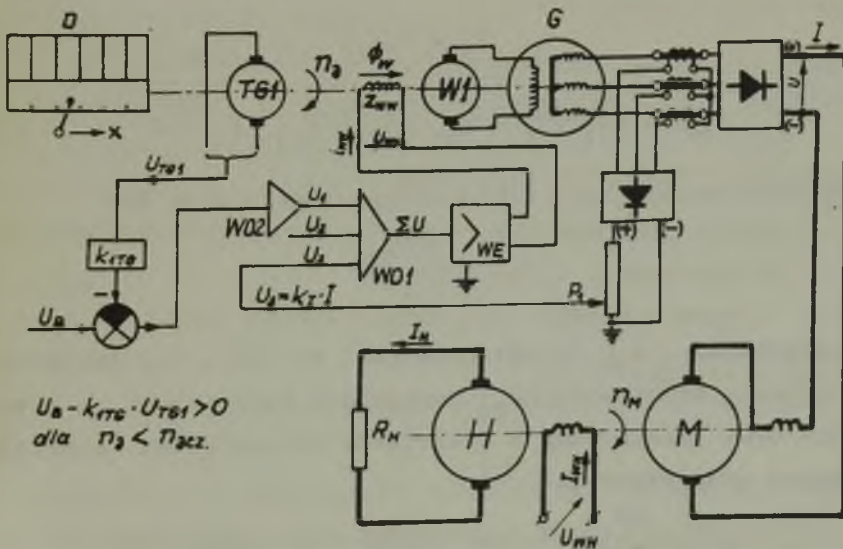
gdzie:

$$T_0 = \frac{J_0}{9,55 \beta}, \quad k_x = \frac{\partial M_0}{\partial x} \frac{I_n}{\beta \cdot n_{0n}}, \quad k_{10} = \frac{\partial M_G}{\partial I} \frac{I_n}{\beta \cdot n_{0n}},$$

$$k_{20} = \frac{\frac{\partial M_G}{\partial I} \cdot i_{wn}}{\beta \cdot n_{0n}}, \quad \beta = \left| \frac{\partial M_0}{\partial n_0} - \frac{\partial M_G}{\partial n_0} \right|, \quad N = \frac{\frac{\partial M_G}{\partial n_0} - \frac{\partial M_0}{\partial n_0}}{\left| \frac{\partial M_G}{\partial n_0} - \frac{\partial M_0}{\partial n_0} \right|}$$

2.2. Równania opisujące układ przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały" ze wzбудnicą i uzwojeniwą.

W rozpatrywanym układzie przedstawionym na rys. 2 strumień wzбудnicy jest funkcją sumy napięć wejściowych wzmacniacza operacyjnego WO1. Pozostałe elementy układu pozostają bez istotnych zmian w porównaniu z układem przedstawionym na rys. 1, dla



Rys. 2. Schemat laboratoryjnego układu przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały" ze wzбудnicą i uzwojeniwą

tego w niniejszym punkcie wyprowadzono jedynie równanie opisujące przebieg czasowy strumienia wzbudnicy W1

2.2.1. Obwody wzbudzenia wzbudnicy 1 uswojenicowej.

Przyrost strumienia wzbudnicy W1

$$\Delta \Phi_w = \frac{\partial \Phi_w}{\partial \theta_w} (z_{ww} \Delta i_{ww} - \frac{\partial \theta_x}{\partial i_w} \Delta i_w) \quad (26)$$

Przyrost napięcia przyłożonego do uzwojenia wzbudzenia wzbudnicy W1

$$\Delta U_{ww} = R_{ww} \Delta i_{ww} + 2 p_w \sigma_w z_{ww} \frac{d\Delta \Phi_w}{dt} \quad (27)$$

Napięcie wejściowe wzmacniacza operacyjnego W01

$$\Sigma U = k_{u1} U_1 + k_{u2} U_2 + k_{u3} U_3 \quad (28)$$

$$U_3 = k_I I \quad (29)$$

$$\Delta \Sigma U = k_{u1} \Delta U_1 + k_{u2} \Delta U_2 + k_{u3} k_I \Delta I \quad (30)$$

Współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza WE:

$$K_{WE} = \frac{\Delta U_{ww}}{\Delta \Sigma U}$$

Podstawiając Δi_{ww} z równania (27) do (26), zastępując przyrost napięcia wzbudzenia ΔU_{ww} napięciami wejściowymi z równania (30) oraz przechodząc z przyrostów zmiennych na wielkości względnych przyrostów jak

$$\bar{U}_1 = \frac{\Delta U_1}{U_{1n}}, \quad \bar{U}_2 = \frac{\Delta U_2}{U_{1n}}, \quad U_{1n} = U_{2n}$$

otrzymano równanie opisujące zmiany strumienia wzbudnicy W1 w funkcji napięć wejściowych wzmacniacza operacyjnego, prądu wzbudzenia prądnicy i_w oraz prądu obwodu głównego I

$$(T'_{ww} p + 1) \bar{\Phi}_w = k_{ww1} \bar{U}_1 + k_{ww2} \bar{U}_2 + k_{ww3} \bar{I} - k_{ww4} \bar{i}_w \quad (31)$$

gdzie:

$$k_{ww1} = \frac{a_w k_{wE} k_{u1} z_{ww} U_{1n}}{\bar{\Phi}_{wn} R_{ww}}, \quad k_{ww2} = \frac{a_w k_{wE} k_{u2} z_{ww} U_{1n}}{\bar{\Phi}_{wn} R_{ww}}$$

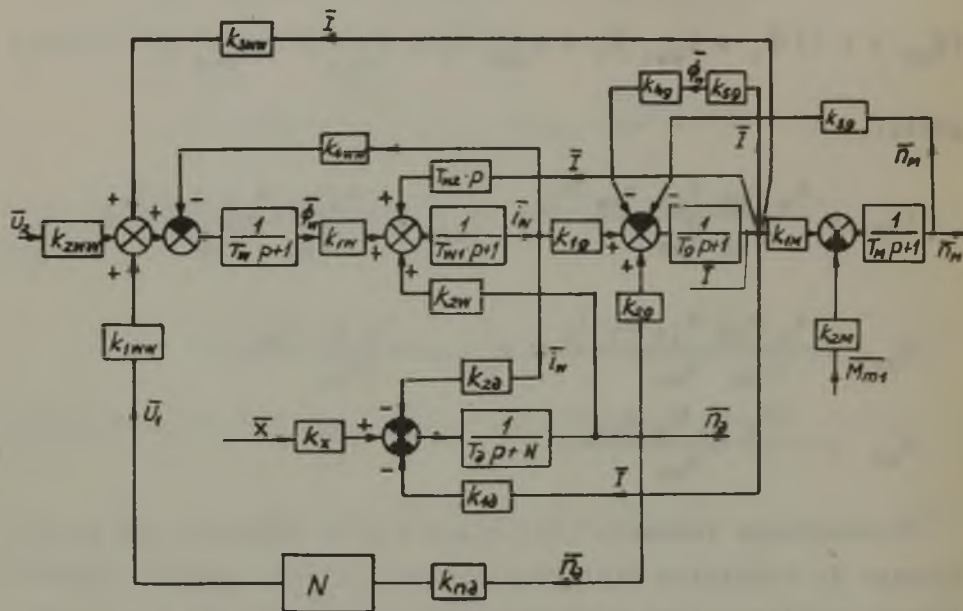
$$k_{ww3} = \frac{a_w k_{wE} k_{u3} k_I I_n}{\bar{\Phi}_{wn} R_{ww}}, \quad k_{ww4} = \frac{a_w a_r i_{wn}}{\bar{\Phi}_{wn}}$$

$$T'_{ww} = \frac{2a_w p_w \sigma_w z_{ww}^2}{R_{ww}}$$

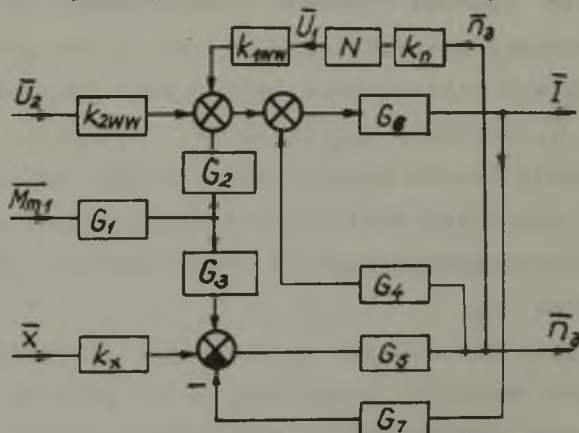
Wyprowadzone równanie (31) różni się od równania (4) odniesionego do wzbudnicy wielouzwójniowej jedynie innymi wartościami współczynników i stałych czasowych. Tak więc schematy blokowe narysowane na podstawie otrzymanych równań będą się w pełni pokrywały. Schemat blokowy rozpatrywanego układu przekładni elektrycznej przedstawiono na rys. 3. Na przedstawionym schemacie blokowym wielkościami wejściowymi są: położenie dźwigni paliwowej \bar{X} , napięcie zasilania \bar{U}_2 uzwojenia z_2 wzbudnicy W2, momenty oporów statycznych wywołane przez hamulec bębnowy \bar{M}_{M1} ; natomiast wielkościami wyjściowymi: prędkość obrotowa zespołu prądotwórczego \bar{n}_0 oraz prędkość obrotowa silnika trakcyjnego \bar{n}_M .

W rozważaniach dotyczących przekładni elektrycznej interesuje nas przede wszystkim prawidłowa praca silnika spalinowego w związku z czym jako wielkości wyjściowe regulowane będziemy traktować prędkość zespołu prądotwórczego n_0 i prąd obwodu głównego \bar{I} natomiast prędkości silnika trakcyjnego nie ma

potrzeby wyodrębnić na schemacie blokowym. Przykład schematu blokowego uproszczonego w ten sposób przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Zastępczy schemat blokowy laboratoryjnego układu przedkładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały"



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy przedkładni elektrycznej

3. Badania doświadczalne

3.1. Opis układu laboratoryjnego przekładni elektrycznej

Model przekładni elektrycznej zbudowany oraz uruchomiony w laboratorium Katedry Elektrotechniki Przemysłowej składa się z zespołu prądowórczego oraz zespołu silników trakcyjnych (rys. 5). Dane znamionowe głównych maszyn i urządzeń laboratoryjnego modelu przekładni elektrycznej:

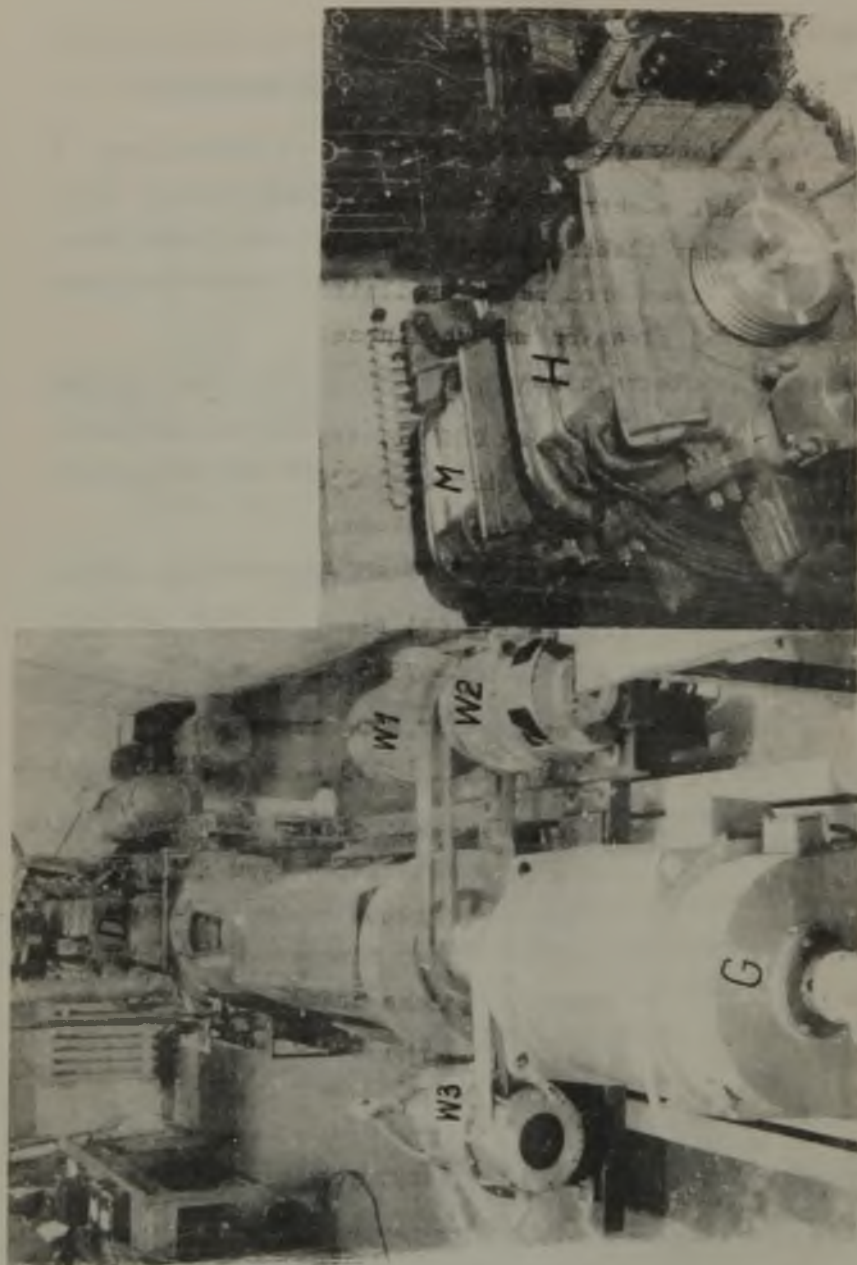
- silnik wysokoprężny (D) firmy CSEPEL, typu D614, moc maksymalna 143 KM przy prędkości obrotowej 2300 obr/min, maksymalny moment obrotowy 50 kGm przy prędkości 1400 obr/min., ilość cylindrów 6, pojemność skokowa 8275 cm³,
- prądnica synchroniczna 3 fazowa (P) firmy "Komel" typu GCd84b
 $P_n = 55 \text{ kVA}$, $U_n = 400/231 \text{ V}$, $I_n = 79,5 \text{ A}$, $n_n = 1500 \text{ obr/min}$,
- silniki szeregowo prądu stałego (M,H) - tramwajowe typu USL-333, $P_{60} = 60 \text{ kW}$, $U_n = 600 \text{ V}$, $I_{60} = 113 \text{ A}$, $n_{60} = 830 \text{ obr/min}$,
- układ prostownikowy włączony w obwód główny przekładni elektrycznej zbudowany jest z diod krzemowych typu BY100/3 łączonych szeregowo po dwie w każdej gałęzi mostka 3-fazowego.

Diody zbocznikowano obwodami R i C dla zabezpieczenia ich przed przepięciami komutacyjnymi. Dane znamionowe diody BY100/3
 $I_n = 100 \text{ A}$, $U_n = 300 \text{ V}$, $U_{gran} = 600 \text{ V}$, warunki chłodzenia - radiator typu P101 - chłodzenie wymuszone.

3.2. Cel i zakres pomiarów laboratoryjnych

Celem przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych było:

- wyznaczenie przebiegu charakterystyk wielkości wyjściowych $U = f(I)$ prądnicy synchronicznej połączonej z układem prostownikowym, odpowiadających różnym wartościom prądu wzbudzenia i prędkości obrotowej,



Rys. 5. Zespół prądowórczy i zespół silników trakcyjnych

D - silnik wysokoprężny, M, H - silniki szeregowe prądu stałego, G - prądnica synchroniczna, W1 - wzбудnica 1 uzwojeniova, Hb - hamulec bębnowy, W2 - wzbudnica 3 uzwojeniova, W3 - wzbudnica 3 fazowa synchroniczna, TG1 - tachoprądnica

- ustalenie wymaganego przebiegu prądu wzbudzenia prądnicy synchronicznej $i_w = f(I)$ zapewniającego odbiór stałej mocy z wału silnika spalinowego przy ustalonym położeniu jego dźwigni paliwowej w założonym zakresie obciążeń silnika trakcyjnego,
- określenie wpływu parametrów pracy układu zamkniętego oraz wpływu poszczególnych jego obwodów na spadek prędkości obrotowej silnika diesla w funkcji prądu obciążenia silnika trakcyjnego M ,
- wyznaczenie przybliżonej transmitancji obwodu głównego przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały",
- praktyczne określenie wpływu procesów przejściowych w obwodach elektrycznych na przebiegi wielkości mechanicznych i szybkich zmian wielkości mechanicznych (M_{m1}, n_0) na przebiegi wielkości elektrycznych.

Przechodząc do omówienia zakresu pomiarów laboratoryjnych należy mieć na uwadze dwa aspekty tego zagadnienia: zakres wielkości parametrów mierzonych wiążący się dla układów zamkniętych przekładni elektrycznych - z tzw. zakresem wykorzystania mocy silnika spalinowego oraz zakres tematyczny pomiarów. W każdym realnym układzie przekładni elektrycznej typu "prąd przemienny - prąd stały" zakres wykorzystania pełnej mocy oraz mocy cząstkowych silnika spalinowego ograniczone są:

- a) Maksymalnym prądem obciążenia silników trakcyjnych i prądnicy synchronicznej z układem prostownikowym, którego wartość ustala się na podstawie prądu obciążenia ciągłego *maszyn* i przyjętego współczynnika $k_I = \frac{I_{\max}}{I_c}$, $1 < k_I < 2$.

Wartość tego współczynnika zależna jest od przewidywanego charakteru pracy lokomotywy.

- b) Maksymalnym napięciem roboczym w/w elementów przekładni.
- c) Minimalnym stopniem wzbudzenia α_{\min} silników trakcyjnych uzyskiwanym w danym układzie przekładni.
- d) Maksymalną prędkością obrotową silników trakcyjnych $n_{M \max}$ odpowiadającą maksymalnej prędkości pojazdu V_{\max} .

Ostatnie trzy ograniczenia (b,c,d) wyznaczają minimalny prąd obciążenia silników trakcyjnych.

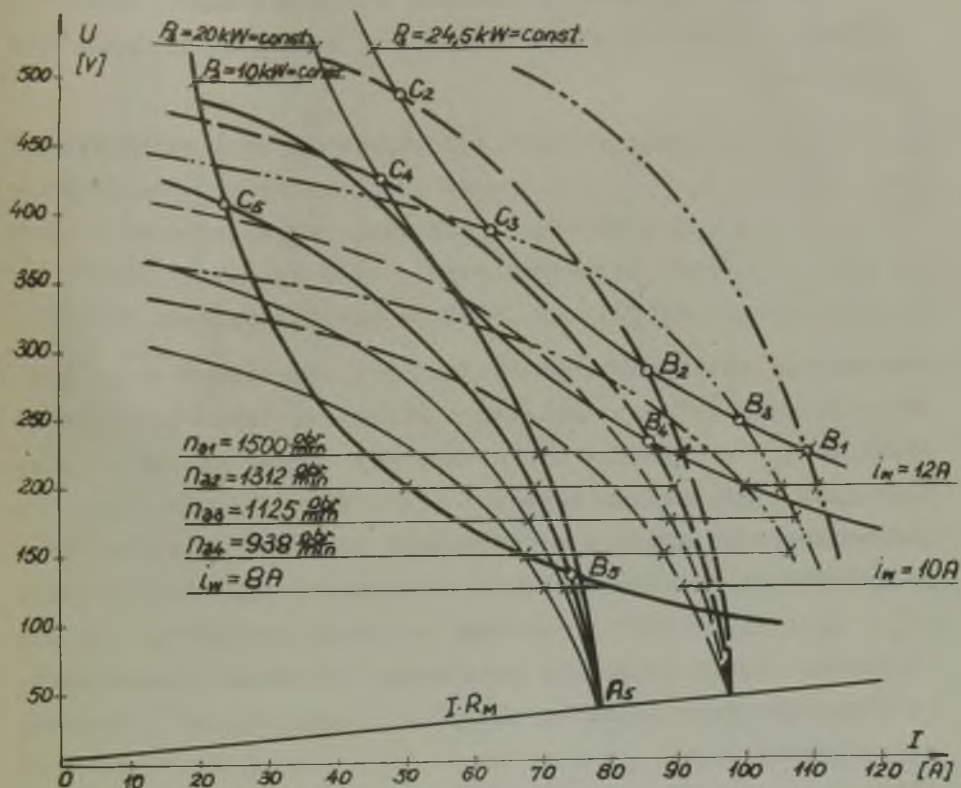
Dla rozpatrywanego układu laboratoryjnego przekładni elektrycznej ustalone następujące parametry ograniczające zakres wykorzystania mocy silnika diesla: $U_{\max} = 525 \text{ V}$, $I_{\min} = 46,7 \text{ A}$, $I_{\max} = 115 \text{ A}$ (wielkości mierzone na wyjściu układu prostownikowego), $n_{0 \max} = 1500 \text{ obr/min}$.

W ramach przeprowadzonych pomiarów sporządzono:

- a) charakterystyki statyczne wielkości wyjściowych zespołu prądotwórczego w układzie otwartym dla stałych wartości prędkości obrotowych tego zespołu oraz prądów wzbudzenia prądnicy synchronicznej (rys. 6),
- b) charakterystyki statyczne napięcia U i mocy P_3 (mierzonych na wyjściu układu prostownikowego) oraz prędkości obrotowej n_0 w funkcji prądu obciążenia silnika trakcyjnego I dla kilku wariantów zamkniętego układu przekładni elektrycznej (rys. 7, 8 i 9),
- c) zdjęcia oscylograficzne przebiegów przejściowych, a mianowicie:
 - przebiegu prądu w obwodzie głównym (I) przy skokowej zmianie napięcia wzbudzenia prądnicy synchronicznej i zahamowanym silniku trakcyjnym M (rys. 10),
 - przebiegi wielkości elektrycznych oraz prędkości zespołu prądotwórczego w czasie włączania i wyłączania oporu bocznikującego (bez dławika) uzwojenie szeregowe silnika trakcyjnego oraz w trakcie skokowych zmian położenia dźwigni paliwowej silnika diesla (rys. 11-12).

3.3. Omówienie wyników badań doświadczalnych

Na podstawie charakterystyk $U = f(I)$ przedstawionych na rys. 6, wysnuć można następujące wnioski dotyczące układów regulacji mocy przekładni typu "prąd przemienny - prąd stały".



Rys. 6. Charakterystyki statyczne $U=f(I)$ prądnicy synchronicznej pomierzone na wyjściu układu prostownikowego w otwartym układzie przekładni elektrycznej

- a) Dla ograniczonych zakresów wykorzystania pełnej lub częściowej mocy, wyznaczonych punktami $B_2 - C_2$, $B_3 - C_3$, $B_4 - C_4$ (rys. 6) zbytecznym jest stosowanie dodatkiego sprzężenia

prądowego ($k_{3ww} = 0$). Warunkiem właściwego wykorzystania założonej mocy silnika diesla, w przyjętym zakresie obciążeń prądnicy, wyznaczonym np. punktami $B_2 - C_2$ przy określonym położeniu dźwigni paliwowej silnika jest wprowadzenie obwodu ujemnego sprzężenia podług prędkości diesla n_D . W układzie bez tego sprzężenia dochodzi do nadmiernego dławienia prędkości obrotowej silnika diesla i zmniejszenia jego mocy wyjściowej.

- b) W celu rozszerzenia zakresu wykorzystania mocy wyznaczonego np. punktami $B_1 - C_2$ koniecznym jest już stosowanie dodatniego sprzężenia prądowego i ujemnego prędkościowego lub samego sprzężenia prędkościowego z członem astatycznym zapewniającym hiperboliczny przebieg charakterystyki $U=f(I)$.
- c) Wejście na charakterystykę pełnej lub częściowej mocy (pkt. $A_5 - B_5$ rys. 6) przy zachowaniu stałej wartości prądu wzbudzenia i_w w prądnicy synchronicznej odbywa się przy nieznacznym zmniejszeniu wartości prądu I obwodu głównego, w małym stopniu zależnym od prędkości obrotowej zespołu prądotwórczego. Omawiany przebieg charakterystyki $U=f(I)$ (pkt. $A_5 - B_5$ rys. 6) jest korzystny, zapewnia bowiem w sposób możliwie prosty uzyskanie pożądanego kształtu charakterystyki trakcyjnej pojazdu, zbliżonej częściowo do krzywej przyczepności.

Bliższe porównanie właściwości szeregu wariantów zamkniętego układu laboratoryjnego przekładni elektrycznej będzie najprościej przeprowadzić na podstawie danych zestawionych w załączonej tabeli 1.

Tablica 1

Oznaczenia układu	nr rys. (charakterystyki)	n_0 [Imin] (obr/min)	$P_3(I_{min}) = U_{max} I_{min} \cdot 10^{-3}$ [kW]	I_{min} (A)	I_{max} (A)	$\Delta n_0 \frac{max}{n_0}$ [Imin]	P_{3max}/P_3 [Imin]	Sygnaly ster. sumowane na wzmacniaczu	Zastosowane sprzężenie
1a-1	7	1500	23,0	50	99,3	0,123	0,23	W2	+I
1a-2	8	1290	21,2	48,3	115	0,215	0,293	W2	+I
1b-2	-	1290	21,2	48,3	115	0,101	0,198	W2	+I-n ₀
1a-3	-	1270	21,0	48,4	130	0,236	0,380	W2	+I
1b-3	-	1270	21,0	48,4	130	0,07	0,167	W2	+I-n ₀
2a-4	9	1312	14,4	48	86	0,084	0,087	W01	+I
2b-4	9	1312	14,4	48	86	0,03	0,062	W01	+I-n ₀

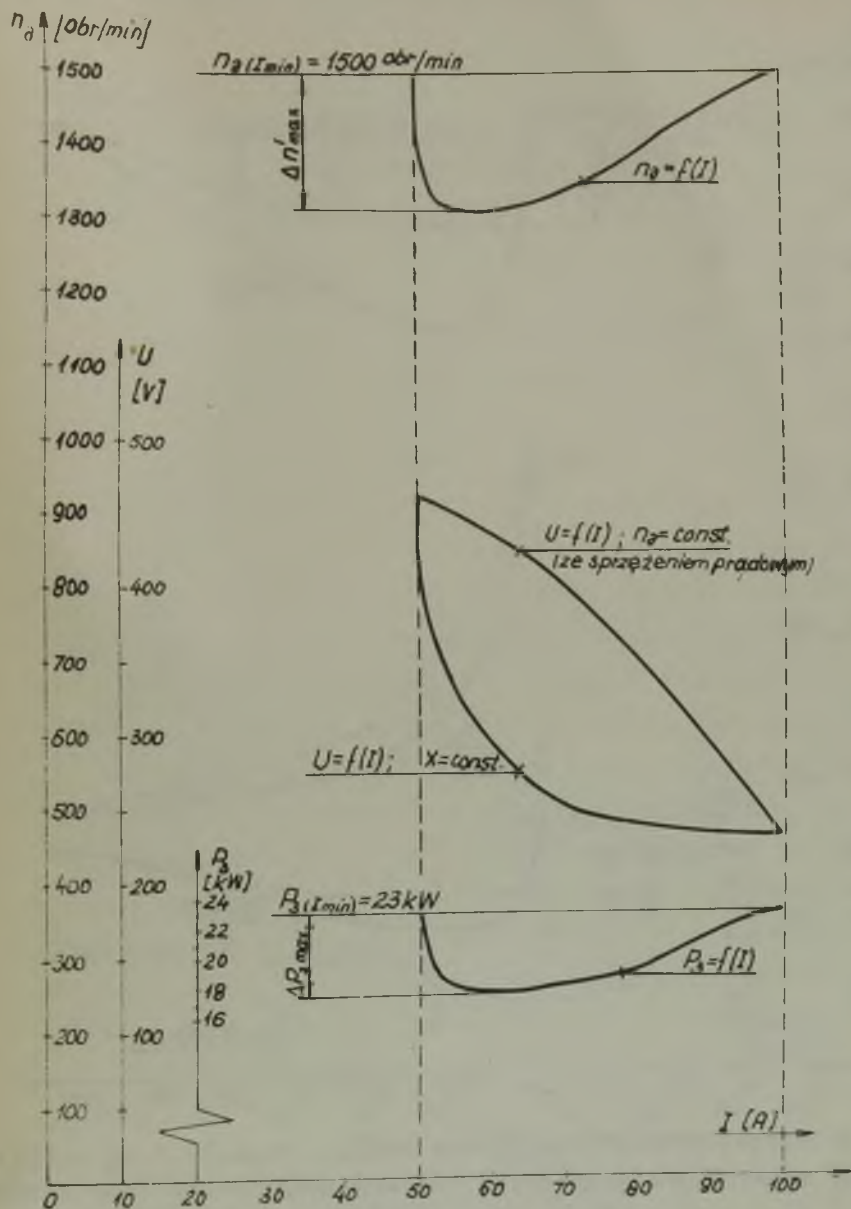
W2 - wzmacniacz elektromaszynowy - wzbudnica wielouzwojeniowa

W01 - wzmacniacz operacyjny

Przebiegi charakterystyk $U = f(I)$, $P_3 = f(I)$ i $n_0 = f(I)$ omawianych wariantów układu przedstawiono na rys. 7, 8 i 9. Jak wynika z zestawionych w tabeli 1 wartości mocy P_3 i prędkości obrotowych $n_0(I_{\min})$, pomiary charakterystyk realizowano w zakresie obciążeń silnika diesla odpowiadających wzrastającemu momentowi obrotowemu M_0 przy wzroście prędkości n_0 . Temu zakresowi pracy silnika odpowiada ujemna wartość współczynnika N (wzór 25).

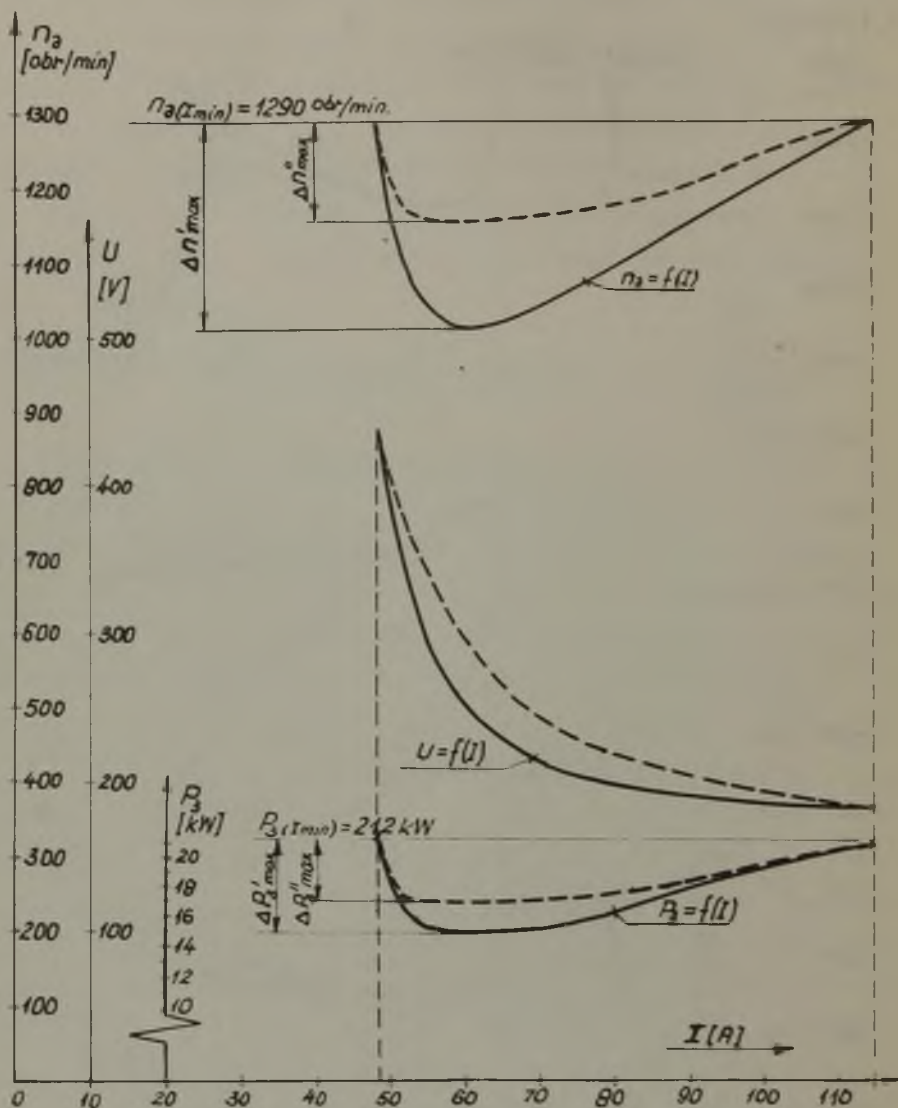
Przyjmując, że $\left(\frac{\partial M_0}{\partial n_0}\right)_I = \text{const} \approx 0$ otrzymamy:
$$N = \frac{-\frac{\partial M_0}{\partial n_0}}{\left|\frac{\partial M_0}{\partial n_0}\right|}$$

W rozpatrywanych układach wyszczególnionych w tabeli 1 ujemna wartość współczynnika N , charakterystyczna dla pracy układu na poziomie mocy cząstkowych, odwraca znak współczynnika wzmocnienia funkcji przejścia $G_5(p=0)$ z dodatniego na ujemny (rys. 4). Wyniki zestawione w tabeli wskazują, że zasadniczy wpływ na spadek prędkości obrotowej silnika diesla ma uzyskany zakres wykorzystania mocy określony stosunkiem I_{\max}/I_{\min} zależny zarówno od współczynnika wzmocnienia k_{3ww} obwodu sprzężenia prądowego jak również od wyboru górnego punktu pracy na rozpatrywanej charakterystyce cząstkowej. Ze wzrostem wartości współczynnika k_{3ww} powiększają swoją wartość współczynniki wzmocnienia funkcji przejścia określone na schemacie strukturalnym (rys. 4) blockami G_4 i G_6 . Określenie wpływu poszczególnych współczynników wzmocnienia układu przedstawionego na rys. 4 na kształtowanie się charakterystyki $n_0 = f(I)$ jest utrudnione, bowiem wartości tych współczynników zmieniają się w granicach kilkudziesięciu procent w zależności od parametrów układu oraz rozpatrywanego punktu pracy. Wprowadzenie obwodu ujemnego sprzężenia prędkościowego powoduje w każdym wypadku znaczne ograniczenie spadku prędkości obrotowej silnika diesla.

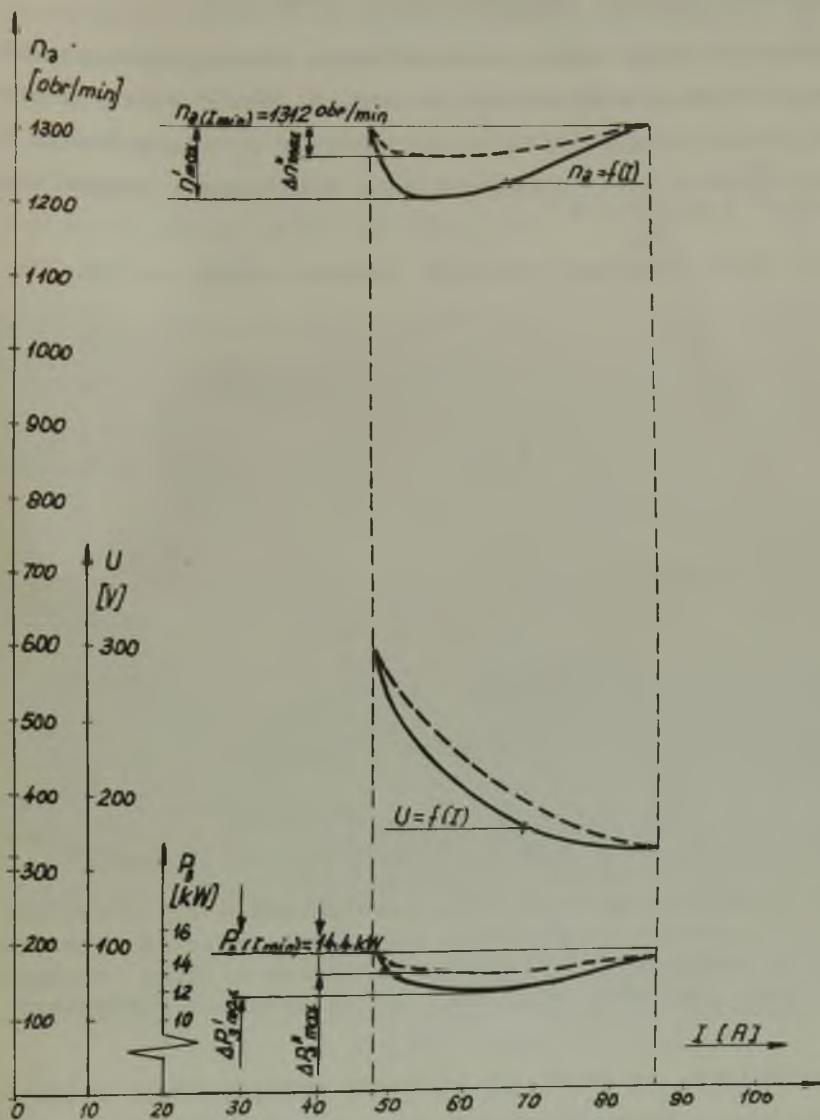


Rys. 7. Charakterystyki statyczne $U=f(I)$, $P_3 = f(I)$ i $n_d=f(I)$ układu zamkniętego przekładni elektrycznej o symbolu 1 - a: (patrz tab. 1)

Oznaczenia: U - napięcie, I - prąd, $P_3 = UI$ - moc. Parametry pomierzone na wyjściu układu prostownikowego



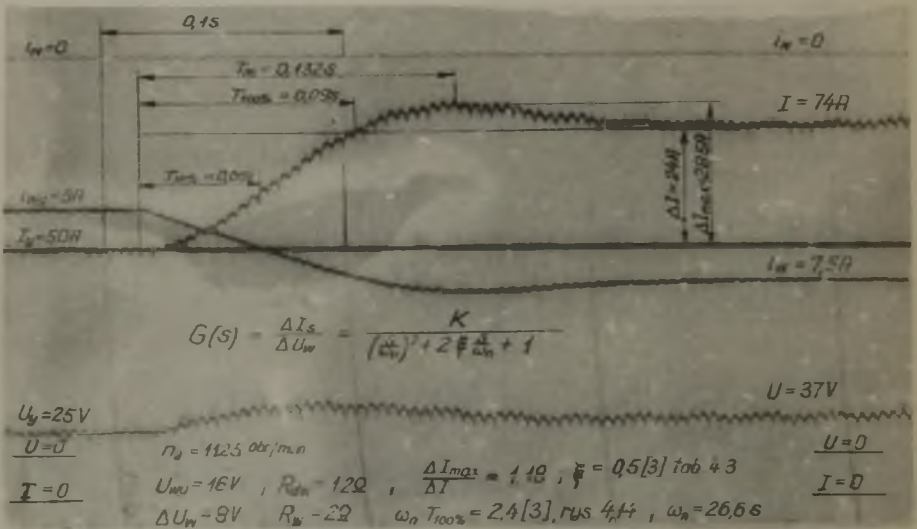
Rys. 8. Charakterystyki statyczne $U=f(I)$, $P_3=f(I)$ i $n_0 = f(I)$ układów zamkniętych przekładni elektrycznej 1a-2 i 1b-2 (tabl.1)



Rys. 9. Charakterystyki statyczne $U=f(I)$, $P_3=f(I)$ i $n_0=f(I)$ układów zamkniętych przekładni elektrycznej 2a - 4 i 2b - 4 (tabl. 1)

Wykonane pomiary oscylograficzne pozwoliły

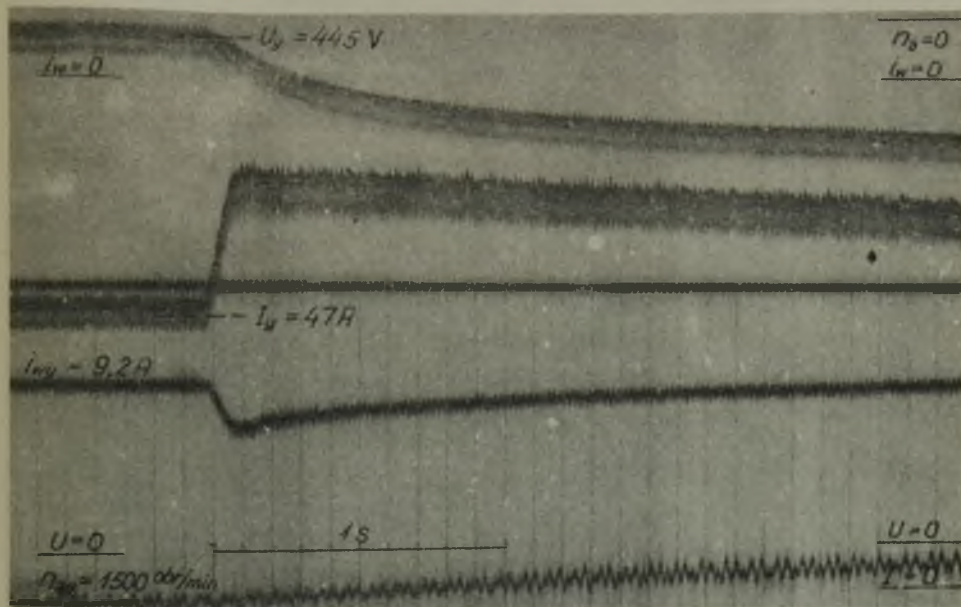
- a) wyznaczyć przybliżoną transmitancję obwodu głównego układu przekładni przedstawionej na rys. 1. Obwód główny przekładni przedstawia sobą człon oscylacyjny o transmitancji typu
- $$\frac{K}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\xi\frac{s}{\omega_n} + 1}$$
- oraz dane dotyczące warunków pomiaru podano na rys. 10.



Rys. 10. Oscylogram przebiegów przejściowych $i_w = f(t)$, $U = f(t)$ i $i_w = f(t)$ wywołanych skokowym przyrostem napięcia wzbudzenia prądnicy synchronicznej, przy zahamowanym silniku trakcyjnym M i stałej prędkości obrotowej n_0 zespołu prądotwórczego

- b) stwierdzić, że przebiegi procesów przejściowych związane z włączeniem oporu bocznikującego uzwojenie silnika szeregowo-

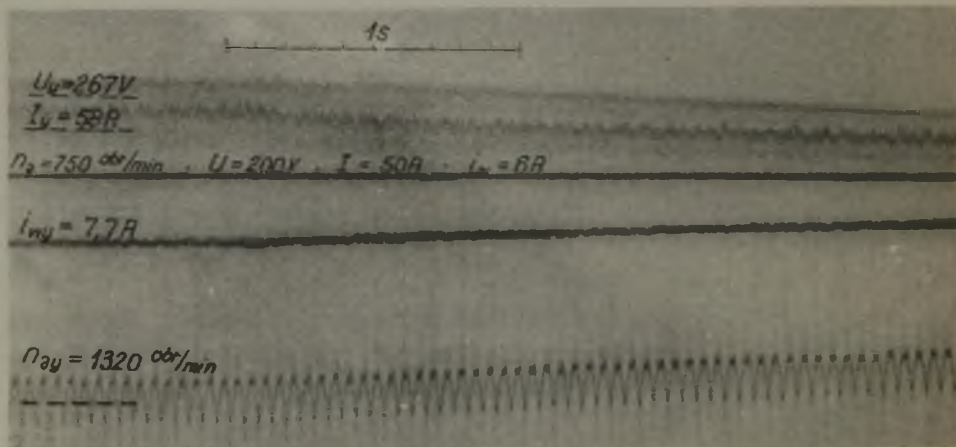
to wywołują lekko zaznaczone przyhamowanie zespołu prądowtwórczego (rys. 11), natomiast względnie szybkie zmiany prędkości obrotowej zespołu uzyskane np. poprzez ograniczenie dopływu paliwa powodują proporcjonalne (bez dostrzegalnych przeregulowań i opóźnień) zmiany wielkości elektrycznych obwodu głównego (rys. 12).



Rys. 11. Oscylogram przebiegów przejściowych $I=f(t)$, $U=f(t)$, $i_w = f(t)$ i $n_0 = f(t)$ wywołanych załączeniem oporu bocznikującego uzwojenie szeregowo silnika trakcyjnego przekładni elektrycznej w układzie 1a-1 (tabl.1)

4. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić, jakie czynniki mają decydujący wpływ na zakres wykorzystania i jakość regulacji mocy przekładni elektrycznej. Jakość regulacji odzwierciedla bezpośrednio wielkość spadku prędkości obrotowej Δn_0 silnika diesla. Powiększanie zakresu wykorzystania mocy w układach ze sprzężeniem prądowym i wewnętrznym sprzężeniem prędkościowym nieodłącznie związanym z autonomicznymi zespołami prądotwórczymi doprowadza do znacznego spadku prędkości obrotowej zespołu co jest jednoznaczne z ograniczeniem wykorzystania pełnej mocy silnika diesla. Zamknięcie układu poprzez odrębny obwód ujemnego sprzężenia podług prędkości zespołu prądotwórczego pozwala znacznie ograniczyć omawiany wyżej szkodliwy spadek tej prędkości.



Rys. 12. Oscylogram przebiegów przejściowych $I=f(t)$, $U=f(t)$ i $i_{ny} = f(t)$ i $n_0 = f(t)$ wywołanych skokową zmianą położenia dźwigni paliwowej silnika diesla w przekładni elektrycznej wg układu 1a-1 (tabl. 1)

Dalsze badania układów regulacji mocy przekładni elektrycznych typu "prąd przemienny - prąd stały" powinny być prowadzone w kierunku maksymalnego ograniczenia spadku prędkości obrotowej zespołu prądotwórczego (przy stałym podaniu paliwa) na bazie regulacji ciągłej, statycznej lub astatycznej, przy wykorzystaniu elementów mnożących i obwodów korygujących współczynniki wzmożenia w torze głównym układu oraz prowadzenia analizy stabilności rozpatrywanych układów w celu określenia warunków przy których grozi powstawanie drgań samowzbudnych.

LITERATURA

- [1] Stiepanow A.D.: Awtomatyczeskoe regulirovanie mosznosti w tieplowozach i gazturbowozach, Izd. "Maszinstrojenie" Moskwa 1964.
- [2] 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.).
- [3] Płaskowski A.: Eksperymentalne wyznaczanie własności dynamicznych obiektów regulacji WNT Warszawa 1965.

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ТИПА "ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК - ПОСТОЯННЫЙ ТОК"

Р е з ю м е

Актуальные стремления в развитии тепловозов с электропередачей идут в направлении все более широкого применения передач типа "переменный ток - постоянный ток". Вышеуказанный фактор решил о выборе направления исследований, проводимых в Кафедре Промышленной Электротехники при Силезском Политехническом Институте в Гливицах на лабораторной системе электропередачи, составленной из дизельного двигателя 3-хфазного синхронного генератора вместе с возбудителями, мостиковой системы выпрямления и тягового двигателя с последовательным возбуждением. Мощность переносимая передачей может доходить до 40 л.с. при диапазоне регулирования $\frac{I_{max}}{I_{min}} = 2$.

В рамках проводимых до настоящего времени работ получено упрощенное математическое описание замкнутой системы передачи типа "переменный ток - постоянный ток" и сравнительные результаты лабораторных измерений статических и динамических характеристик разомкнутой системы и несколько избранных вариантов замкнутой системы. Приведено формулировку выводов относительно программы дальнейших исследований.

ANALYSIS AND RESEARCHES OF LABORATORY SYSTEM
OF "A.C. - D.C." TYPE ELECTRIC TRANSMISSION

S u m m a r y

Development of diesel locomotives with electric transmission trends towards broad use of transmissions of type alternating Current - direct current". Above mentioned factor decided the selection of research direction carried out in Politechnika Śląska - Gliwice, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej (Industrial Electrotechnic Department) on laboratory system of electric transmission, consisting of diesel engine of synchronous 3-phase generator with excitors, bridge rectifier circuit, and series traction engine. Power transmitted through transmission can reach 40 H.P. at control range $\frac{I_{max}}{I_{min}} = 2$.

Within the previous researches the simplified mathematical description of closed - loop control system of "direct current - alternating current" type transmission was obtained as well as the comparative results of laboratory measurements regarding the statical and dynamical characteristics of unmonitored control system and some variants of closed - loop control system. The conclusions for a program of further researches were formulated.