

BOGUSŁAW GRZESIK

Katedra Napędu Elektrycznego

CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE SILNIKA OBOWZBUDNEGO
PRĄDU STAŁEGO STEROWANEGO WZMACNIACZEM MAGNETYCZNYM

Streszczenie. W referacie omówiono sposoby sporządzania charakterystyk mechanicznych silnika obcowzbudnego prądu stałego sterowanego jednofazowym wzmacniaczem magnetycznym w obwodzie twornika. Sporządzono różnymi metodami charakterystyki mechaniczne dla układu otwartego oraz zamkniętego z różnymi sprzężeniami i porównano z wynikami badań laboratoryjnych.

Wstęp

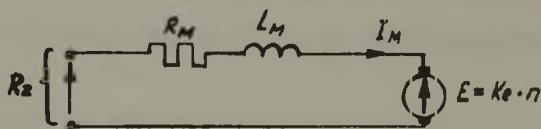
Rozwój technologii półprzewodników spowodował to, że coraz częściej w zautomatyzowanych napędach elektrycznych zaczęto stosować tyristory. Ze względu jednak na dość znaczne koszty samych tyristorów oraz układów sterowniczych nie są one jeszcze stosowane powszechnie.

Od szeregu lat dość znacznie rozpowszechnione są zautomatyzowane napędy elektryczne małej mocy wykorzystujące wzmacniacze magnetyczne samonasywane (WM) do sterowania silnika obcowzbudnego prądu stałego w obwodzie twornika. WM są urządzeniami statycznymi i znalazły szerokie praktyczne zastosowanie dzięki wielu zaletom: np.: długi czas pracy, duża niezawodność, niskie koszty eksploatacyjne oraz niewielki koszt produkcji. Istotną niedoskonałością jest bezwładność uzwojeń sterujących. Projektowanie tych układów nastrocza pewne trudności. Różnorodne metody sporządzania charakterystyk statycznych dają w efekcie bardzo różniące się między

sobą rezultaty. W pracy przedstawiono dwie metody sporządzania charakterystyk mechanicznych układu otwartego, które podano w [2], [3], [4], [6]. Autorzy [3]: [6] podają sposoby sporządzania charakterystyk mechanicznych dla przypadku sterowania silnikiem obco-wzbudnym przy pomocy wzmacniacza bez wewnętrznego sprzężenia zwrotnego. Autorzy [4] dają przykład sporządzania charakterystyk mechanicznych silnika szeregowego zasilanego trójfazowym wzmacniaczem samonasycanym. Jedną z metod sporządzania charakterystyk mechanicznych układów zamkniętych podano w [5]. W pracy sporządzono charakterystyki dla układu otwartego oraz dla układu zamkniętego i porównano je z wynikami pomiarów laboratoryjnych.

2. Sporządzanie charakterystyk mechanicznych układu otwartego

Jeden ze sposobów [3], [6] polega na sporządzeniu i wykorzystaniu charakterystyk sterowania WM.



Rys. 1. Schemat obwodu twornika

WM zasilający twornik silnika prądu stałego, można uważać, zakładając, że indukcyjność twornika $L_M \approx 0$, jako obciążony zmienną opornością rzeczywistą jak na rys. 1.

Można napisać:

$$U = I R_M + K_e \cdot n \quad (1)$$

czyli oporność zastępcza

$$R_z = f(n); I = \frac{U}{I} = R_M + \frac{K_o \cdot n}{I} \quad (2)$$

dla $n = 0$

$$R_{z \min} = R_M$$

dla $I = 0$

$$R_{z \max} = \infty$$

Aby wyznaczyć charakterystyki mechaniczne $n = f(I)$ $I_z = \text{const}$ silnika prądu stałego sterowanego WM należy wyznaczyć rodzinę charakterystyk sterowania $I_o = f(I_z)$ przy $R_o = \text{const}$ gdzie I_o - prąd obciążenia, I_z - prąd sterujący, R_o - oporność obciążenia.

Mając zależność (1) i rodzinę charakterystyk sterowania zakładamy $I_z = \text{const}$ i obliczamy prędkość obrotową z zależności (2). Pomierzono rodzinę charakterystyk sterowania i przedstawiono na rys. 2. Charakterystyki mechaniczne pomierzone w układzie jak na rys. 3. oraz sporządzone graficznie przedstawiono na rys. 4.

Charakterystyki sterowania otrzymać można z przeliczenia znamionowej charakterystyki sterowania (znamionowa oporność obciążenia 30Ω) dla innych oporności obciążenia. Przedstawiono je na rys. 2.

Charakterystyki mechaniczne układu otwartego sporządzone podanym sposobem grafo-analitycznym są bardzo dalekie w swoim kształcie od pomierzonych. Pierwszą przyczyną jest upraszczające założenie do tej metody: zakłada się proporcjonalność prędkości do napięcia średniego. Pomiar wykazał istnienie obszaru niestabilności, co powodowane jest nieuwzględnieniem w tej metodzie kształtu prądu twornika.

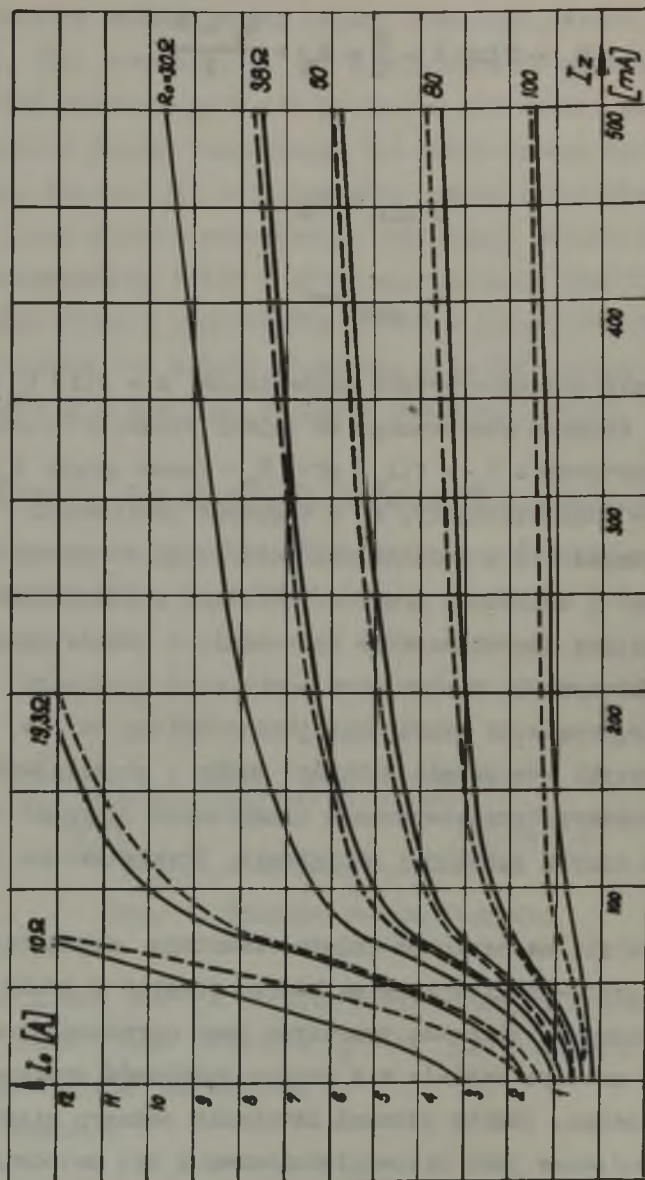
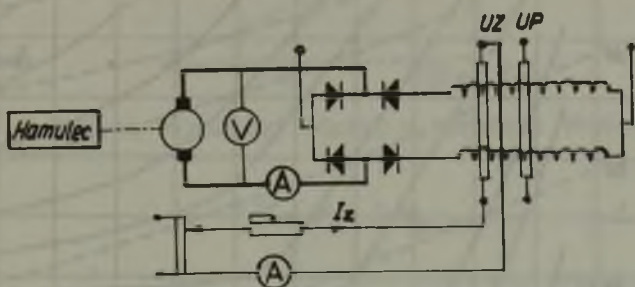


Fig. 2. Charakterystyki sterownika wzmacniacza magnetycznego $I_0 = f(I_z)R_0$ const
 - - - - - pomierzono ———— przeliczono



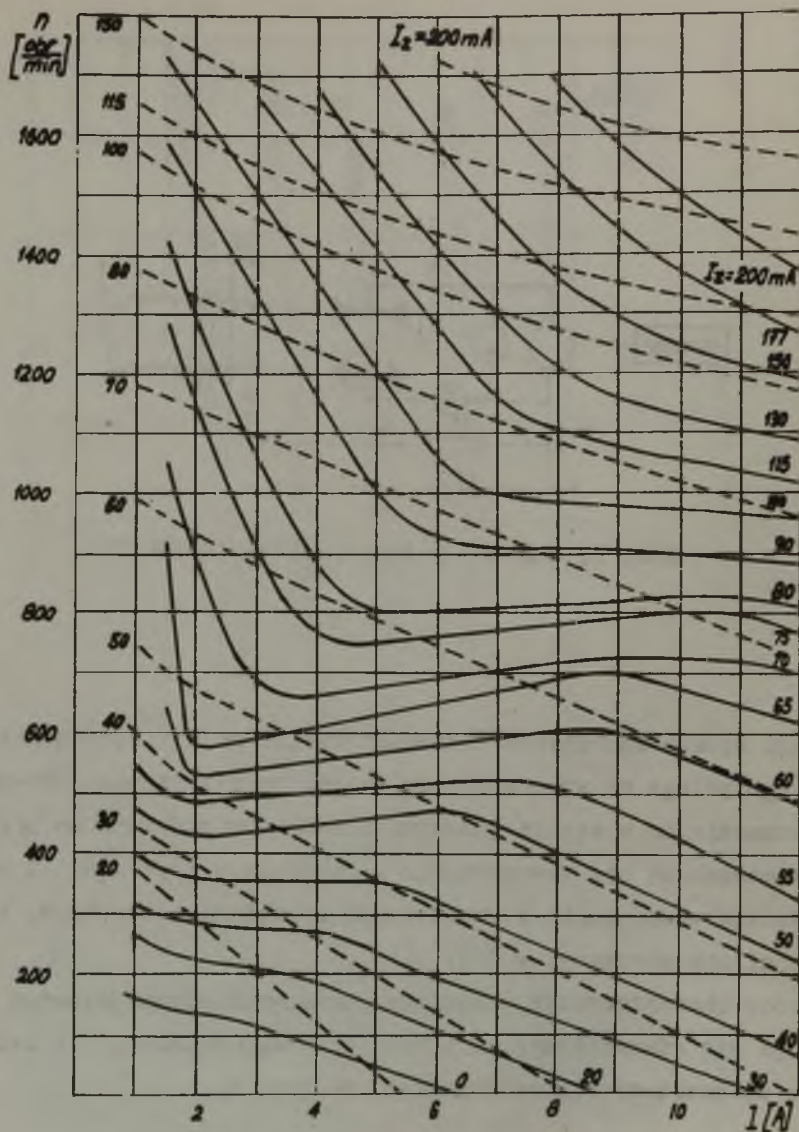
Rys. 3. Schemat połączeń układu otwartego

Drugi sposób sporządzania charakterystyk mechanicznych układu otwartego polega na wykorzystaniu charakterystyk napięciowo-prądowych wzmacniacza w stanie jałowym. Sposób ten omówiono na przykładzie wzmacniacza bez wewnętrznego sprzężenia w [3]: [6] i na przykładzie wzmacniacza z wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym, który zasila silnik szeregowy w [4].

Oprócz charakterystyk napięciowo prądowych stanu jałowego wykorzystuje się równanie napięć obwodu głównego silnika, dla którego podano uproszczony wykres wektorowy na rys. 5.

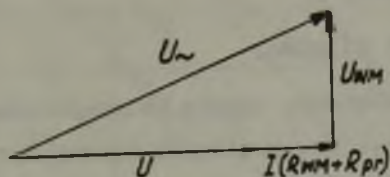
$$U^2 = U_{WM}^2 + [U + I(R_{WM} + R_{pr})]^2 \quad (3)$$

$$U_{WM} = I X_{WM} k_s \quad (4)$$



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne układu otwartego $n = f(I)$ $I_z = \text{const}$

———— pomierzone - - - - obliczone



Rys. 5. Wykres wektorowy napięć w obwodzie twornika

$$U = E + I R_M \quad (5)$$

$$\left(\frac{U_{WM}}{U_{\sim}}\right)^2 + \left(\frac{E k_s}{U_{\sim}} + \frac{I (R_M + R_{WM} + R_{pr}) k_n}{U_{\sim}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{U_{WM}}{U_{\sim}}\right)^2 + \left(\frac{n_o}{n} + \frac{I}{I_k}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

gdzie:

U_{WM} - napięcie na dławiku,

U_{\sim} - napięcie sieci zasilającej wzmacniacz,

n - prędkość obrotowa,

$$n_o = \frac{U}{k_s \cdot K_e},$$

k_s - współczynnik kształtu krzywej napięcia,

$$K_e = \frac{E}{n},$$

$$I_k = \frac{U}{k_s R_M + R_{WM} + R_{pr}},$$

R_M - oporność wewnętrzna silnika,

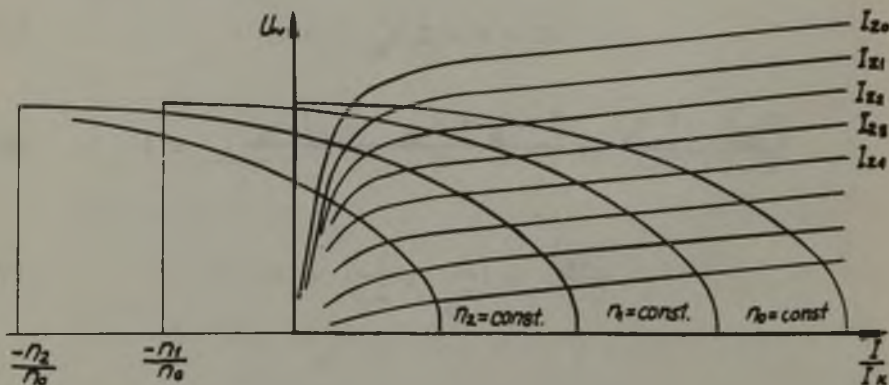
R_{WM} - oporność wewnętrzna wzmacniacza,

R_{pr} - " " prostownika,

I - prąd silnika,

U - napięcie silnika.

Równanie (7) przedstawia elipsę. Na pomierzoną rodzinę charakterystyk (rys. 6) napięciowo-prądowych nanosi się elipsy (7), które

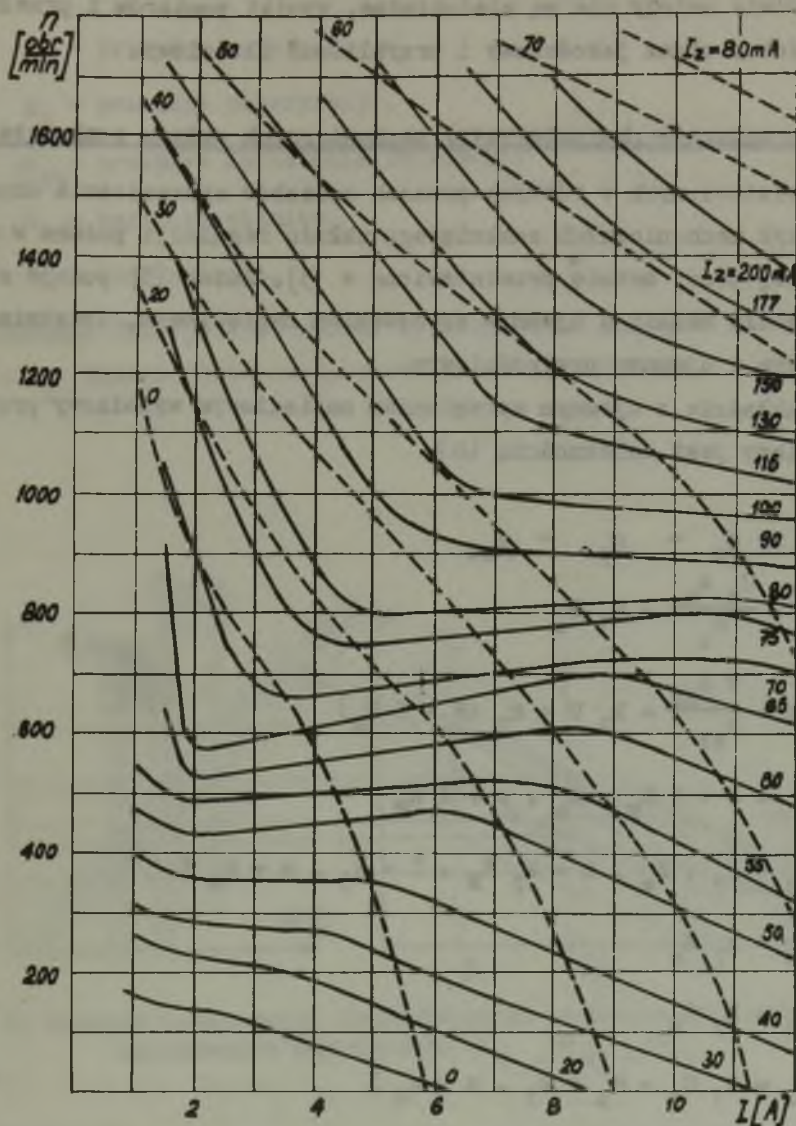


Rys. 6. Schemat konstrukcji charakterystyk mechanicznych układu otwartego $I_{z0} < I_{z1} < I_{z2} \dots n_0 < n_1 < n_2 \dots$

sporządzone są dla różnych prędkości obrotowych. Dla jakiejś wybranej wartości prądu I_z w obwodzie sterującym odczytujemy współrzędne: prędkość obrotową i prąd w obwodzie twornika.

Powtarzając to dla różnych prądów I_z otrzymujemy charakterystykę mechaniczną. Otrzymane w ten sposób charakterystyki mechaniczne układu otwartego porównano z pomierzonymi na rys. 7.

Charakterystyki mechaniczne układu otwartego sporządzone drugim sposobem również odbiegają od pomierzonych. Spowodowane jest to uproszczonym kształtem krzywej napięcie przy sprowadzaniu napięcia silnika U do obwodu prądu zmiennego.



Rys. 7. Charakterystyki mechaniczne układu otwartego $n = f(I)$ $I_z = \text{const}$

———— pomierzone - - - - - obliczone

Obydwie metody nie są niedokładne, wyniki pomiarów i przeliczeń dają dobry obraz jakościowy i przybliżony ilościowy.

3. Sporządzanie charakterystyk mechanicznych układu zamkniętego

Z przedstawionych w różnych pracach sposobów sporządzania charakterystyk mechanicznych zamkniętego układu regulacji podano w niniejszej pracy metodę przedstawioną w [5]. Autor [5] podaje swoją metodę dla układu z ujemnym sprzężeniem napięciowym, dodatnim prądowym i ujemnym prędkościowym.

W układzie z ujemnym sprzężeniem napięciowym wypadkowy przepływ określony jest zależnością (8)

$$\theta_w = \theta_z - \theta_p - \theta_{sz} \quad (8)$$

$$\theta_z = \frac{U_z z_z}{R_z} = k_1 U_z \quad (9)$$

$$\theta_{sz} = \frac{U_z s_z}{R_{st}} = k_2 U = k_2 (E + I R_M) \quad (10)$$

$$U = E + I R_M = K_e \cdot n + I R_M \quad (11)$$

$$\theta_{sz} = k_2 \cdot K_e \cdot n + k_2 R_M \cdot I = k_3 \cdot n + k_4 I \quad (12)$$

$$k_3 = k_2 K_e \quad (13)$$

$$k_4 = k_2 R_M \quad (14)$$

$$\theta_w = k_1 U_z - \theta_p - k_3 \cdot n - k_4 I \quad (15)$$

$$\theta_w + k_3 \cdot n = k_1 U_z - \theta_p - k_4 I \quad (16)$$

$$\varphi_1(n, I) = \varphi_2(U_z, I) \quad (17)$$

gdzie:

θ_z - przepływ zadający,

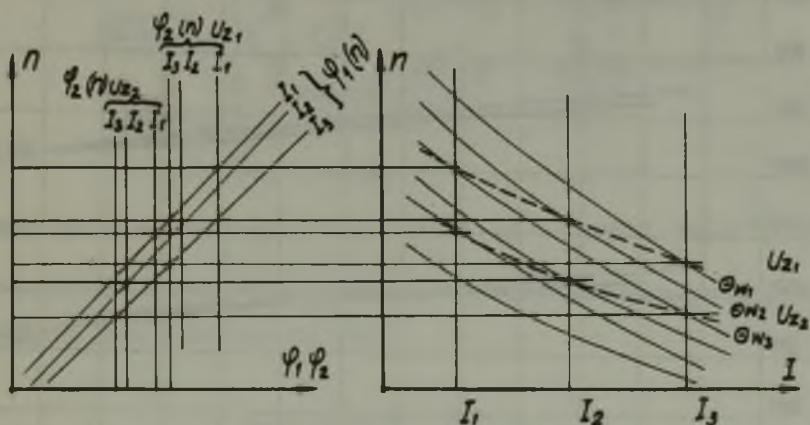
θ_p - przepływ polaryzacji,

θ_{sz} - przepływ sprzężenia zwrotnego,

U - napięcie silnika,

I - prąd silnika.

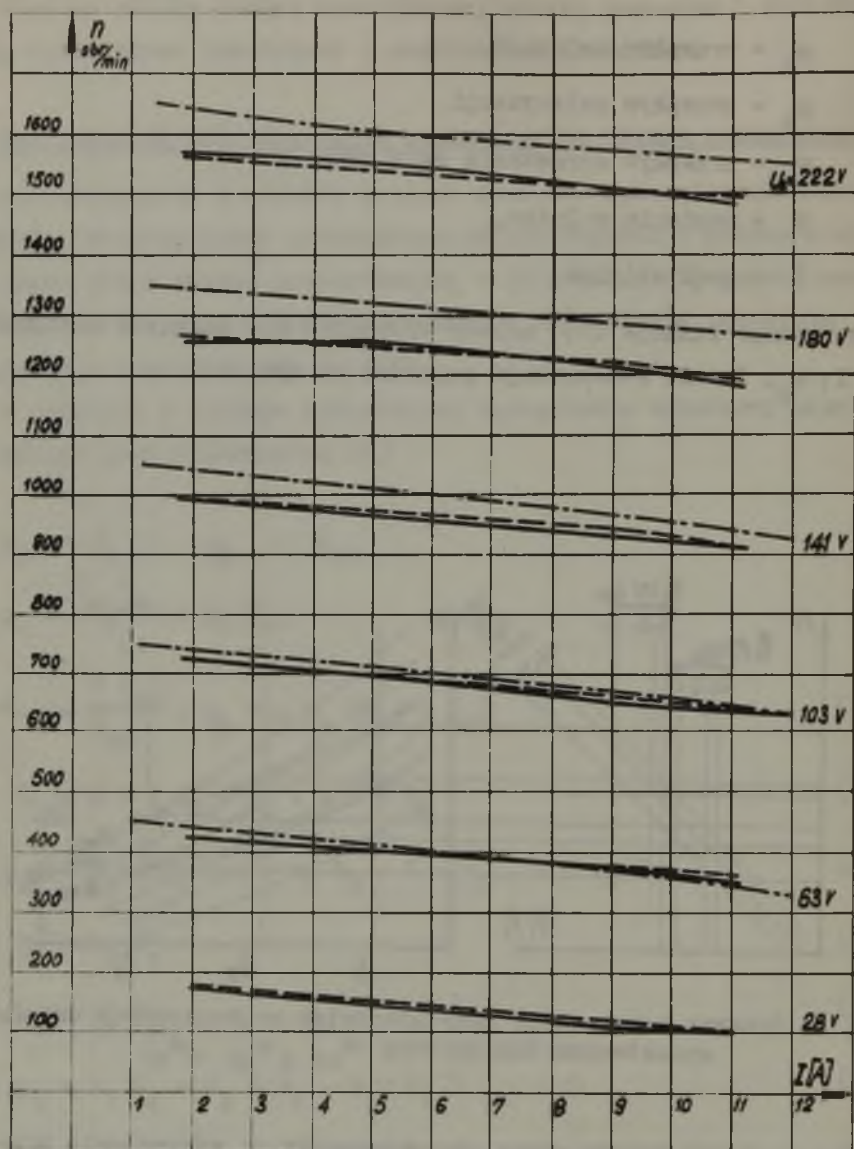
Otrzymane funkcje (17) należy wykreślić dla zadanych wartości: U_z ; I ; θ_p . Zasadę konstrukcji pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Schemat konstrukcji charakterystyk mechanicznych układu ze sprzężeniem napięciowym $\theta_{w1} < \theta_{w2} < \theta_{w3}$

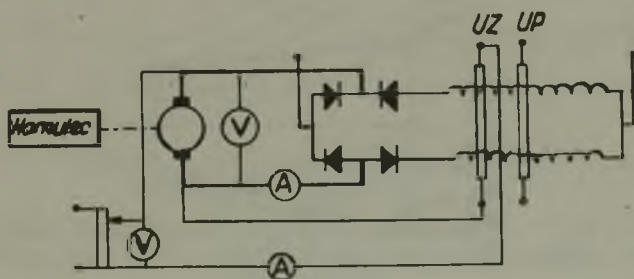
Rozpoczynamy sporządzenie charakterystyk od wykreślenia prostych $I = I_1$, $I = I_2$, I_3 a następnie wykreślenie funkcji

$\varphi_1(n)_{I = I_{1,2,..}}$ oraz $\varphi_2(n)_{U_z = U_{z1,2,..}}$



Rys. 9. Charakterystyki mechaniczne dla układu zamkniętego z ujemnym sprzężeniem napięciowym $n = f(I)$ $U_Z = \text{const}$

Na rys. 9 przedstawiono charakterystyki wykonane według powyższej metody korzystając z charakterystyk układu otwartego uzyskanych na drodze grafo-analitycznej (pierwszy sposób) i charakterystyk układu otwartego uzyskano pomiarowo. Charakterystyki układu zamkniętego porównano rys. 9 z pomiarami wykonanymi w układzie jak na rys. 10.



Rys. 10. Schemat połączeń układu ze sprzężeniem napięciowym

W układzie z dodatkim sprzężeniem prądowym przepływ wypadkowy określony jest zależnością (18)

$$\theta_w = \theta_z - \theta_p + \theta_{sz} \quad (18)$$

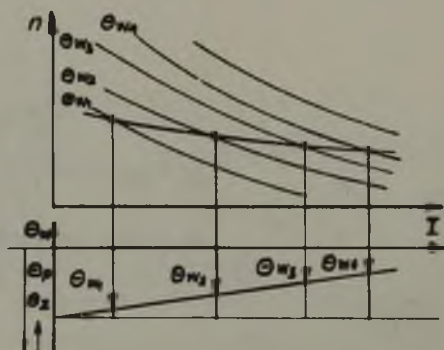
$$\theta_z = \frac{U_z z_z}{R_z} = k_1 U_z \quad (19)$$

$$\theta_{sz} = \frac{I_{sz} R_{sz}}{R_{sz}} = k_2 I \quad (20)$$

gdzie:

- θ_p - przepływ polaryzacji,
- θ_z - przepływ zadający,
- θ_{sz} - przepływ sprzężenia zwrotnego.

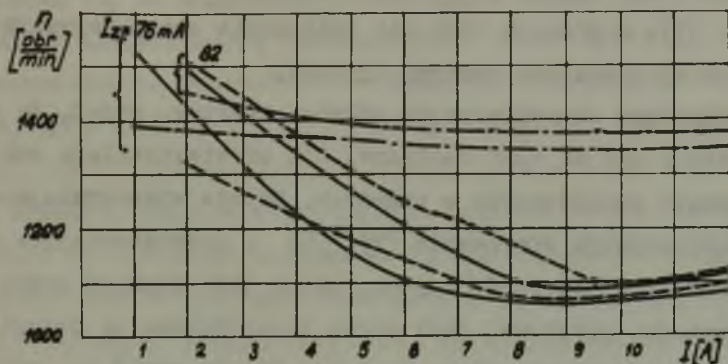
Zasadę konstrukcji charakterystyk układu zamkniętego z dodatnim sprzężeniem prądowym przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Schemat konstrukcji charakterystyk mechanicznych układu z dodatnim sprzężeniem prądowym

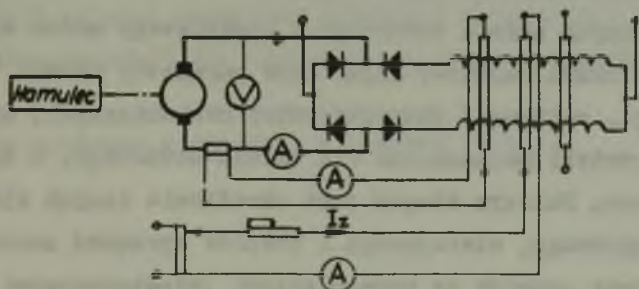
Na rys. 12 przedstawiono charakterystyki wykonane według powyższej metody korzystając z charakterystyk układu otwartego (pierwszy sposób) uzyskanych na drodze grafo-analitycznej i charakterystyk układu otwartego uzyskanych pomiarowo.

Charakterystyki układu zamkniętego porównano rys. 12 z pomiarami wykonanymi w układzie jak na rys. 13.



Rys. 12. Charakterystyki mechaniczne układu zamkniętego z dodatnim sprzężeniem prądowym

- sporządzone w/g pomierzonych charakterystyk układu otwartego
- - - sporządzone w/g obliczonych charakterystyk układu otwartego
- · - · - pomierzone



Rys. 13. Schemat połączeń układu z dodatnim sprzężeniem prądowym

4. Wnioski

Przedstawione metody sporządzania charakterystyk mechanicznych układu otwartego należą do grupy graficzno-analitycznych [2], [3], [4], [6]. Równocześnie istnieją metody, które podają charakterystyki mechaniczne układu otwartego w postaci zależności analitycznych [5]: [7]; w pracach tych dla obliczenia charakterystyk mechanicznych wykorzystano maszyny cyfrowe.

Na przykładzie charakterystyk układu otwartego widać, że przytoczone metody nie są zbyt dokładne. Nie odzwierciedlają one należycie procesów zachodzących w układzie. Metoda wykorzystująca rodzinę charakterystyk sterowania [2], [6] i przedstawiająca silnik jako zastępczą oporność czynną, która jest funkcją prądu twornika i prędkości obrotowej jest mniej pracochłonna od drugiej tu przytoczonej. Dodatkową zaletą jest to, że nie powodując wielkich niedokładności można korzystać z zazwyczaj podawanej znamionowej charakterystyki sterowania, podczas gdy katalogi fabryczne nie podają rodziny charakterystyk napięciowo-prądowych stamu jałowego. Pomiarzy charakterystyk mechanicznych układu zamkniętego wykazały, że odchyłki od charakterystyk pomierzonych nie są duże. Powstałe odchyłki spowodowane są nie uwzględnieniem oporności wewnętrznej źródła sterującego. Sposób ten może być bardzo pomocnym w pracach projektowych.

Korzystając z przedstawionych sposobów sporządzania charakterystyk statycznych układu otwartego i zamkniętego można wstępnie zaprojektować układ napędowy mając dane parametry układu (moc, zakres regulacji, sztywność charakterystyk mechanicznych) sporządza się charakterystyki mechaniczne dla układu otwartego, a następnie dla zamkniętego. Dalszym etapem jest określenie danych elektrycznych obwodu głównego, sterującego i obwodów sprzężeń zwrotnych.

Projektowanie napędów ze wzmacniaczami jedostopniowymi nie nastręcza takich trudności jak projektowanie układów ze wzmacniaczem

wstępnym. W pracach tych stany statyczne nie przysparzają większych trudności, można je przewidzieć z wystarczającą do zapewnienia parametrów statycznych dokładnością. Istotną przeszkodą w dokładnym projektowaniu stanów nieustalonych jest to, że nie jest opracowana dokładna analiza stanów przejściowych przy dużych sygnałach zaburzających oraz to, że stosowanie istniejących metod [8], [9] jest ustrudnione koniecznością wprowadzenia w obwód sprzężeń filtrów oraz koniecznością wprowadzenia elementów eliminujących wsteczne oddziaływanie wzmacniacza głównego. Metody obliczania stanów przejściowych nie są zbyt dokładne i zazwyczaj dają dobre rezultaty dla małych sygnałów zaburzających [9]. Metoda [8] oparta na linearyzacji układu nieliniowego uwzględnia zmianę oporności wewnętrznej wzmacniacza wraz z poziomem wysterowania (generator napięcia o nieliniowej oporności wewnętrznej) daje możliwość wykorzystania teorii regulacji automatycznej układów liniowych. W [8] przedstawiono schemat blokowy układu, który mógłby dać rezultaty bliższe rzeczywistości, gdyby uwzględnić przepływ energii tylko w jednym kierunku tzn. że praca z oddawaniem energii do sieci jest niemożliwa.

Dane układu pomiarowego

Silnik: $P = 1,7 \text{ kW}$; $U = 220 \text{ V}$; $n = 1500 \text{ obr/min}$; $R_{tw} = 1,13 \Omega$

Wzmacniacz magnetyczny; typ WM 2500/380; 1700 W; 380 V prądu zmiennego; 220 V prądu stałego; 50 Mz; 7,7 A. Prąd znamionowy sterowania 0,16 A; prąd termiczny uzwojenia sterującego 1 A; oporność uzwojeń sterujących $12,6 \Omega$ oporność uzwojenia roboczego $1,24 \Omega$

Rękopis złożono w redakcji w czerwcu 1968 r.

LITERATURA

- [1] Paszek W.: Wzmacniacze elektromaszynowe i transduktorowe. Gliwice 1963.
- [2] Afanasjev W.D.: Regulirovanije skorosti dwigatiela postojannowo toka pri pitani jevo ot magnitnovo usitiela Elektricestwo 1958 nr 3, s.14-19.
- [3] Sandler A.S.: Elektrooborudowanije proizvodstwiennych miechaniz-mow. Moskwa 1958.
- [4] Alenčikov D.A., Kuljebakin W.C.: Metod rasčota charakteristik dwigatieliej postojannowo toka s drossielnym upravlenijem. Avtomatika i tjelemechanika 1959 nr 20.
- [5] Bielawski S.: Analiza pracy układów transduktorowych silnika bocznikowego prądu stałego. Rozprawa doktorska. Warszawa 1962.
- [6] Bielawski S.: Regulacja prędkości silników bocznikowych prądu stałego przy pomocy wzmacniaczy magnetycznych. Przegląd Elek-trotechniczny 1960 nr 11.
- [7] Czajkowski A.: Charakterystyki mechaniczne silnika prądu sta-łego zasilanego ze wzmacniacza magnetycznego. Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej "Elektryka" 1962 nr 10.
- [8] Borovikov M.A.: Dinamika elektroiceskovo sistema upravlienija MUS-D. Elektromechanika 1965 nr 2.
- [9] Borovikov M.A. Pierechodnyje processy dwigatielja postojannowo toka v sistemie MUS-D. Elektromechanika 1964 nr 1.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМОГО МАГНИТНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Р е з ю м е

В докладе рассмотрены способы составления механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения, управляемого однофазным магнитным усилителем в цепи якоря. Составлено при помощи различных методов механические характеристики для разомкнутой и закрытой системы с различными обратными связями и сопоставлено с результатами лабораторных исследований.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE
SEPARATELY EXCITED D.C. MOTOR CONTROLLED
BY TRANSDUCTOR AMPLIFIER

S u m m a r y

In the report were described the ways of making out of mechanical characteristics of the separately excited D.C. motor controlled by one-phase transducer amplifier in the armature circuit. By means of the different methods the mechanical characteristics for opened and closed system with different couplings, were made and compared with results of the laboratory testing.