

MGR INŻ. JAN GAJEWSKI

Zarząd Energetyczny Okręgu Południowego

WYKREŚLNE WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK
MASZYNY SYNCHRONICZNEJ
Z UWZGLĘDNIENIEM NASYCENIA ŻELAZA

S t r e s z c z e n i e . Charakterystykę biegu jałowego maszyny synchronicznej $E = f(i)$ przedstawiono w formie wzoru: $E = k \cdot a \cdot i$, używając dwu współczynników, z których jeden ujmuje zależność prostoliniową $a = \text{const}$, drugi zależność nieliniową spowodowaną nasyceniem żelaza $k = k(i)$. Opierając się na tak określonej zależności, po wprowadzeniu dodatkowej wielkości przeliczeniowej (przekładnia prądów m.s.- $\frac{1}{j}$) dokonano modyfikacji wykresu wektorowego maszyny synchronicznej cylindrycznej nasyconej. Wykres w nowej postaci dostosowano do graficznego rozwiązania dowolnych charakterystyk maszyny. Podano sposoby wyznaczania niektórych charakterystyk oraz wzór na określenie prądu wzbudzenia w maszynie nasyconej w zależności od pozostałych parametrów.

Przedstawiona na rysunku 1 charakterystyka biegu jałowego maszyny synchronicznej $E = f(i)$ składa się z 2 części: prostoliniowej i krzywoliniowej. Część prostoliniową charakterystyki określimy wzorem

$$E = a \cdot i \quad (1)$$

gdzie E - oznacza siłę elektromotoryczną,
 i - prąd wzbudzenia,
 a - stały współczynnik proporcjonalności.

Wstawiając do wzoru (1) wartości: $E = U_N$ i $i = i_N$
(Rys. 1) otrzymamy.

$$U_N = a \cdot i_N \quad (2)$$

Z wyrażenia (2) można wyliczyć współczynnik proporcjonalności a :

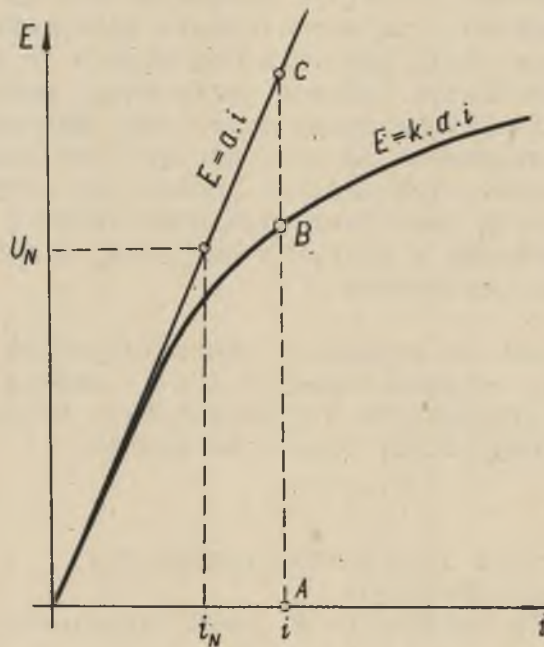
$$a = \frac{U_N}{i_N} \quad (3)$$

Część krzywoliniową charakterystyki $E = f(i)$ ujmijemy następującym wzorem

$$E = k \cdot a \cdot i \quad (4)$$

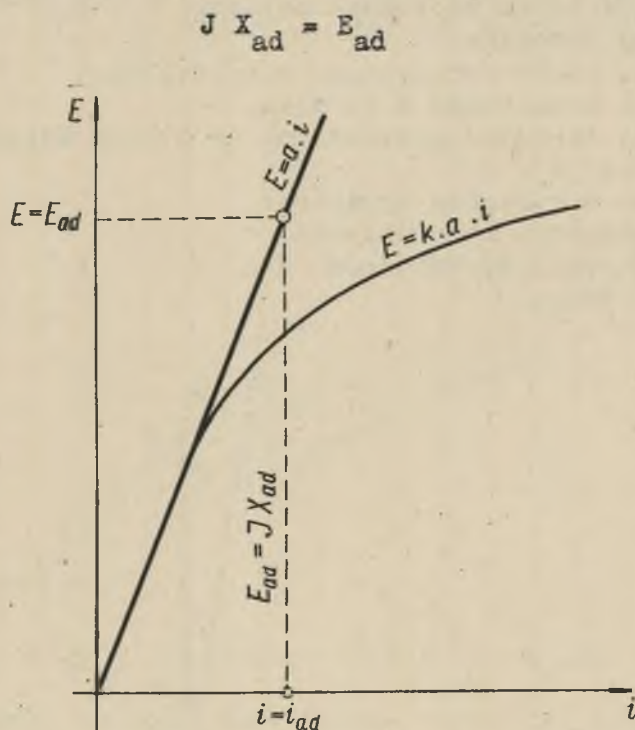
Wprowadzony do wzoru (4) współczynnik k uwzględnia zmniejszenie siły elektromotorycznej wskutek nasycenia żelaza. Jest on wielkością zmienną. Dla każdej wartości prądu wzbudzenia na charakterystyce biegu jałowego można określić odpowiadającą mu wartość k ze stosunku odcinków \overline{AB} i \overline{AC} (rys. 1).

$$k = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} \quad (5)$$



Rys. 1. Charakterystyka biegu jałowego

Prąd J przepływając przez uzwojenie twornika wytwarza siłę magnetomotoryczną. Określmy wielkość prądu wzbudzenia, jaki musi popłynąć w uzwojeniu wirnika, aby wytworzyć w maszynie siłę magnetomotoryczną równoważną działaniu prądu J . Prąd ten oznaczmy i_{ad} . W celu wyznaczenia prądu i_{ad} posłużymy się charakterystyką prostoliniową $E = a \cdot i$ (rys. 2). Przyjęcie takiej charakterystyki jest równoznaczne z założeniem, że żelazo maszyny nie jest nasycone. W konsekwencji do wzoru na i_{ad} wejdzie wielkość reaktancji oddziaływania twornika - nienasycona - X_{ad} . Iloczyn prądu twornika J i reaktancji X_{ad} daje siłę elektromotoryczną



Rys. 2. Przeliczenie prądu J na stronę wirnika w oparciu o charakterystykę $E = f(i)$

Siłę elektromotorycznej E_{ad} odpowiada na prostoliniowej charakterystyce $E = a \cdot i$ prąd wzbudzenia i_{ad} (rys. 2). Zatem

$$E_{ad} = a \cdot i_{ad} = J \cdot X_{ad}$$

Stąd

$$i_{ad} = \frac{X_{ad}}{a} \cdot J \quad (6)$$

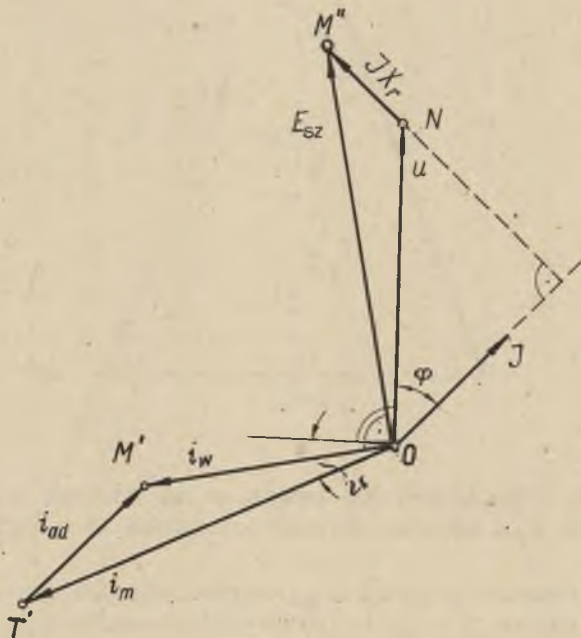
Stosunek prądów

$$\frac{i_{ad}}{J} = \frac{X_{ad}}{a}$$

można traktować w pewnym sensie jako przekładnię prądów maszyny synchronicznej.

Rysunek 3 przedstawia wykres wektorowy maszyny synchronicznej cylindrycznej nasyconej. Na wykresie oznaczono symbolami:

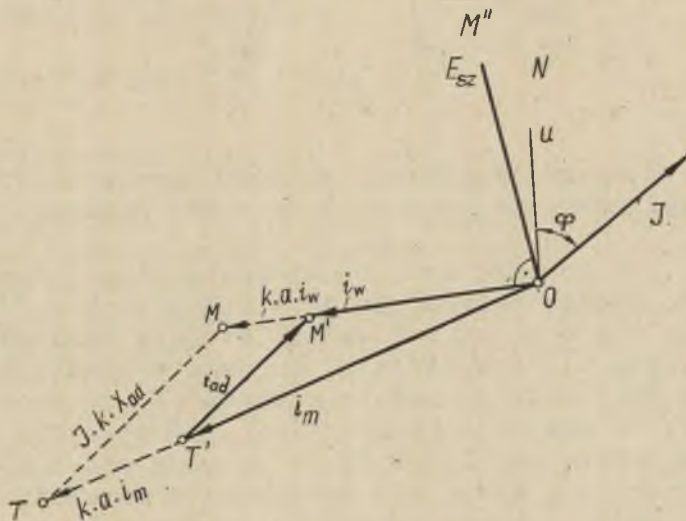
- U - napięcia na zaciskach maszyny,
- J - prąd twornika,
- E_{sz} - siła elektromotoryczna w szczelinie,
- i_m - prąd wzbudzenia w wirniku,
- i_{ad} - prąd twornika przeliczony na stronę wirnika wg wzoru (6),
- i_w - prąd wzbudzenia wypadkowy,
- X_r - reaktancja rozproszenia,
- φ - kąt rozchyłu wektorów U i J ,
- γ - kąt mocy.



Rys. 3. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej cylindrycznej nasyconej

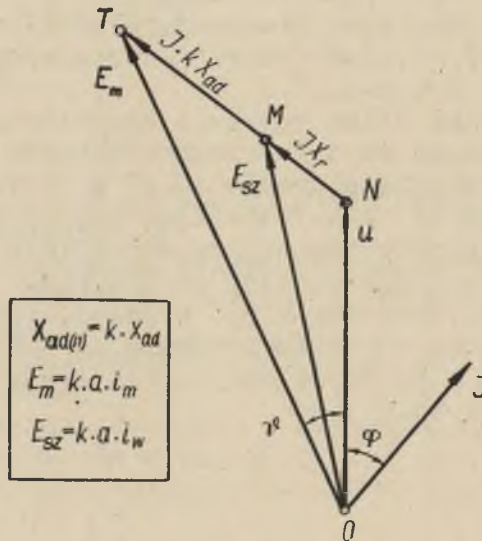
W maszynie synchronicznej obciążonej prądem twornika J siła elektromotoryczna w szczelinie E_{sz} jest rezultatem działania amperozwojów wypadkowych albo wyrażając się inaczej: rezultatem działania wypadkowego prądu wzbudzenia i_w : $E_{sz} = k.a.i_w$.

Przeprowadzimy kilka operacji matematycznych na wykresie (rys. 3) mając na celu przekształcenie go do nowej postaci. Boki trójkąta prądów $\triangle OT'M'$ (rys. 3) przemnożymy przez mnożnik $k.a.$. Dokonując tej czynności prąd i_{ad} zastąpimy wyrażeniem według wzoru (6). Dostaniemy trójkąt napięć $\triangle OTM$ podobny do trójkąta $\triangle OT'M'$ (rys. 4). Trójkąt $\triangle OTM$ obrócimy o 90° w prawo, tak aby jego bok OM pokrył się z bokiem trójkąta $\triangle ONM''-OM''$ (rys. 3). Boki: $OM = OM''$, bo odpowiadające im wyrażenia: $k.a.i_w = E_{sz}$ (rys. 3 i 4).



Rys. 4. Trójkąty $\triangle OT'M'$ i $\triangle OTM$

Otrzymałmy w wyniku nowy wykres wektorowy podany na rysunku 5. Wyrażenie na wykresie $k X_{ad}$ zastąpimy symbolem $X_{ad(n)}$, a wyrażenie $k.a.i_m$ - symbolem E_m . Wielkość $X_{ad(n)} = k X_{ad}$ określa reaktancję oddziaływania twornika nasyconą, a wielkość $E_m = k.a.i_m$ - wewnętrzną siłę elektromotoryczną wytwarzaną przez działanie prądu wzbudzenia i_m przepływającego przez uzwojenie wirnika. Siła elektromotoryczna E_m jest zmniejszona odpowiednio do nasycenia w żelazie ($k < 1$).



Rys. 5. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej cylindrycznej nasyconej w nowej postaci

Z tego, co zostało dotychczas powiedziane, wynika, że wartość współczynnika k jest funkcją: $k = f(i_w)$ lub $k = f(E_{sz})$. Utrudnia to w poważnym stopniu konstrukcję wykresu (rys. 5). Przystępując do jego wykreślenia należy przede wszystkim wyznaczyć wielkość E_{sz} i następnie korzystając z charakterystyki biegu jałowego dla danej $E = E_{sz}$ określić współczynnik k według wzoru (5). Dalsza konstrukcja wykresu nie nastęrcza trudności.

Z zależności geometrycznych na wykresie (rys. 5) wprowadzamy wzór na obliczenie prądu wzbudzenia i dla dowolnych warunków pracy maszyny określonych parametrami: U, J, φ, f .

$$E_m = k \cdot a \cdot i_m = \sqrt{[U + J(kX_{ad} + X_r) \sin \varphi]^2 + [J(kX_{ad} + X_r) \cos \varphi]^2} \quad (7)$$

Stąd

$$i_m = \frac{i_N}{k} \sqrt{[U + J(kX_{ad} + X_r) \sin \varphi]^2 + [J(kX_{ad} + X_r) \cos \varphi]^2} \quad (8)$$

Potrzebną do obliczenia współczynnika k wartość E_{sz} określa się ze znanego wzoru

$$E_{sz} = \sqrt{[U + J X_r \sin \varphi]^2 + [J X_r \cos \varphi]^2} \quad (9)$$

Jeżeli w rachunku będziemy używali jednostek wzdględnych, wzór 8 ulega uproszczeniu (rys. 6):

$$i_m = \frac{1}{k} \sqrt{[\bar{U} + j(k\bar{X}_{ad} + \bar{X}_r) \sin \varphi]^2 + [j(k\bar{X}_{ad} + \bar{X}_r) \cos \varphi]^2} \quad (10)$$

gdzie jako jednostki przyjęto:

znamionową moc pozorną na fazę	P_{pN} (MVA)	$\bar{P}_{pN} = 1,$
znamionowe napięcie fazowe	U_N (kV)	$\bar{U}_N = 1,$
znamionowy prąd twornika	J_N (A)	$\bar{J}_N = 1,$
oporność fazową wg wzoru	$Z_N = \frac{U_N}{J_N}$ (Ω)	$\bar{Z}_N = 1,$
prąd wzbudzenia (rys. 1)	i_N (A)	$\bar{i}_N = 1.$

Wykres wektorowy na rysunku 5 określa dla maszyny synchronicznej cylindrycznej nasyconej ścisłą współzależność wszystkich parametrów, tj.: $U, J, i, \varphi, \mathcal{V}, f$.

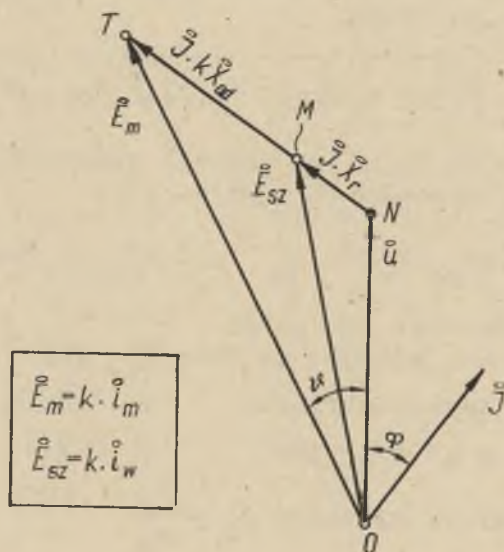
Przy analizowaniu zmian wykresu w zależności od zmian częstotliwości należy uwzględnić, że wielkościami zależnymi od częstotliwości są: a, X_{ad}, X_r . Zależność ich od zmiennej f jest oczywiście wprost proporcjonalna.

Współzależność parametrów: $U, J, i_m, \varphi, \mathcal{V}, f$ jest określona w formie analitycznej następującymi związkami: wzorami (7) i (9), funkcją $k = f(i_w)$ oraz równaniami:

$$E_{sz} = k \cdot a \cdot i_w$$

$$k \cdot a \cdot i_m \cdot \sin \mathcal{V} = J(kX_{ad} + X_r) \cos \varphi$$

Wykres na rysunku 6 przekształcimy do nowej postaci, którą można wykorzystać do wykreślnego wyznaczania charakterystyk maszyny (oczywiście z uwzględnieniem wpływu nasycenia żelaza).



Rys. 6. Wykres wektorowy z rys. 5
p r z e k o n s t r u o w a n y przy użyciu
jednostek względnych

Wykres na rysunku 6 składa się z dwóch trójkątów $\triangle OTM$ i $\triangle ONM$. Przemnażając boki tych trójkątów przez odpowiednio dobrane mnożniki (boki trójkąta $\triangle OTM$ przez mnożnik $\frac{1}{kX_{ad}}$, a boki trójkąta $\triangle ONM$ przez mnożnik $\frac{1}{X_r}$) uzyskujemy zrównanie boków $\overline{TM} = \overline{MN}$. Po przemnożeniu będą one równe wielkości J . Pozwala to przenieść trójkąt $\triangle OTM$ w ten sposób, aby boki \overline{TM} i \overline{MN} pokryły się ze sobą. Sposób przemieszczenia trójkąta $\triangle OTM$ pokazaliśmy na rysunku 7 (trójkąt obróciliśmy wokół punktu M w prawo o 180°).

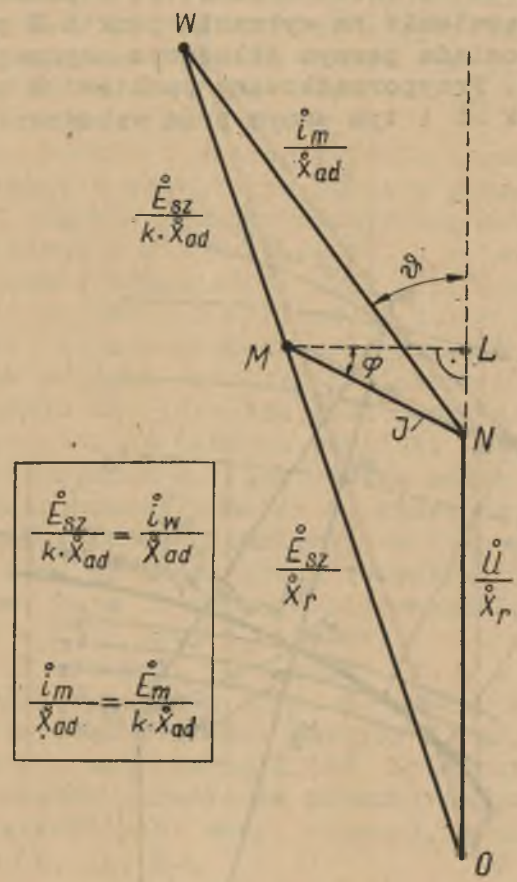
W punkcie N (rys. 7) zbiegają się trzy odcinki: \overline{NO} , \overline{MN} , \overline{WN} . Są one proporcjonalne:

odcinek \overline{NO} do napięcia U ,

odcinek \overline{MN} do prądu J ,

odcinek \overline{WN} do prądu wzbudzenia i_m .

Odcinek \overline{ML} jest proporcjonalny do składowej czynnej prądu twornika (i tym samym przy określonym napięciu U do mocy czynnej - P), a odcinek \overline{LN} - do składowej biernej tego prądu (i odpowiednio do mocy biernej - Q).

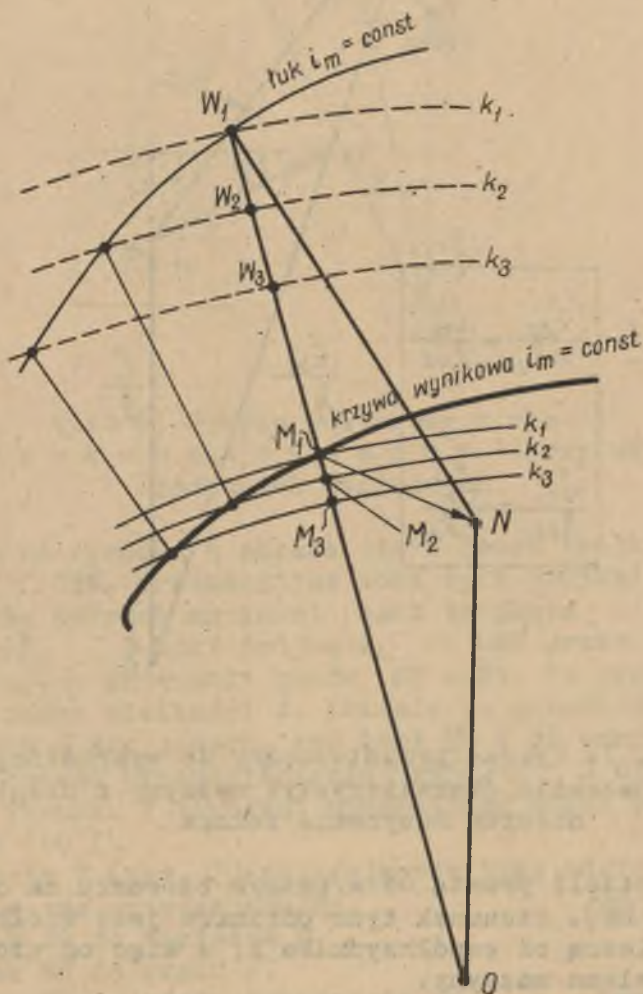


Rys. 7. Wykres przystosowany do wykreślnego wyznaczania charakterystyk maszyny z uwzględnieniem nasycenia żelaza

Punkt M dzieli prostą OW w pewnym stosunku na dwa odcinki (OM i MW). Stosunek tych odcinków jest wielkością zmienną, zależną od współczynnika k, a więc od stopnia nasycenia żelaza maszyny.

Odcinek OM jest proporcjonalny do siły elektromotorycznej E_{sz} . Zatem umiejscowienie punktu M w jakimkolwiek miejscu na wykresie (rys. 7) odpowiada pewnemu nasyceniu żelaza maszyny. Odcinek MW zależy od wielkości E_{sz} i k. Stąd wniosek, że każdemu dowolnie obranemu

punktowi M na wykresie jest ściśle przyporządkowany punkt W i odwrotnie; każdemu punktowi W punkt M . Jednocześnie umiejscowienie na wykresie punktu M przy danym napięciu U odpowiada pewnym składowym czynnej i biernej prądu twornika. Przyporządkowany punktowi M punkt W określa odcinek WN i tym samym prąd wzbudzenia w wirniku.



Rys. 8. Sposób wyznaczenia charakterystyki $J = f(P)$ lub $Q = f(P)$ przy danych: $i_m = \text{const}$ i $U = \text{const}$

Na rysunkach 8, 9, 10 i 11 pokażemy kilka przykładów wyznaczenia charakterystyk maszyny synchronicznej za pomocą metody wykreślnej wynikającej z wykresu (rys. 7). Opiszemy jeden z nich. Jest to sposób wyznaczenia charakterystyki maszyny $J = f(P)$ lub $Q = f(P)$ przy $i_m = \text{const}$ i $U = \text{const}$ (rys. 8).

Zakreślmy z punktu O szereg łuków o promieniach \overline{OM}_1 , \overline{OM}_2 itd. Otrzymamy w rezultacie miejsca geometryczne punktów, które odpowiadają określonym współczynnikom: k_1, k_2 itd. Każdemu z łuków ($r_1 = \overline{OM}_1$, $r_2 = \overline{OM}_2$ itd.) są przyporządkowane odpowiednio łuki o promieniach \overline{OW}_1 , \overline{OW}_2 itd. Jeżeli z punktu N narysujemy łuk o promieniu \overline{NW}_1 , dostaniemy miejsce geometryczne punktów, które odpowiada stałemu prądowi wzbudzenia w wirniku $i_m = \text{const}$.

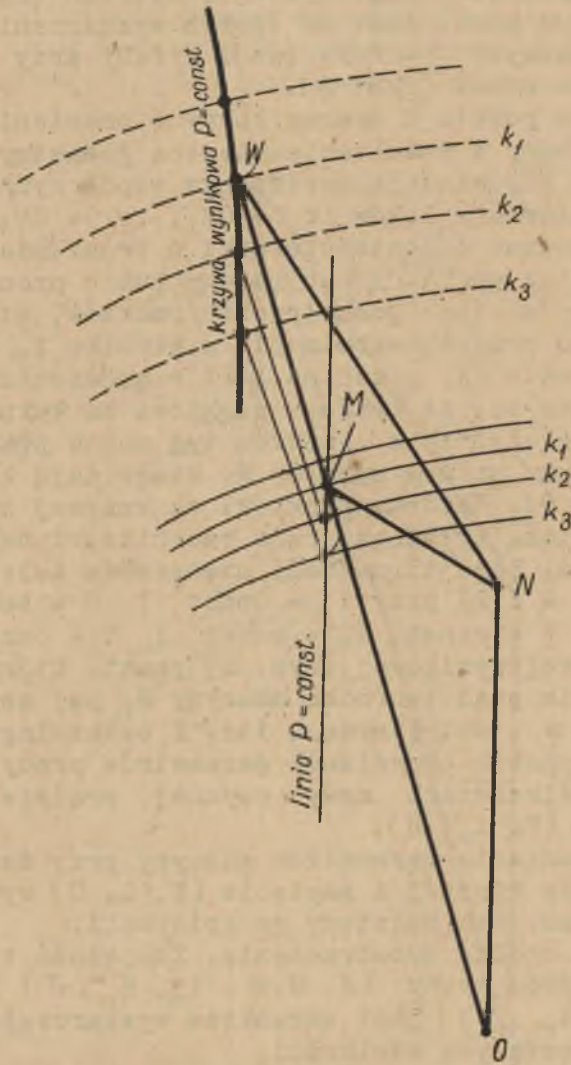
Łuk o promieniu \overline{NW}_1 przecina łuki o promieniach \overline{OW}_1 , \overline{OW}_2 itd. Oznacza to, że każdemu punktowi na łuku odpowiada inny współczynnik k . Punktom tym można przyporządkować odpowiednio szereg punktów M, które dają krzywą wynikową (rys. 8). Każdemu punktowi na krzywej wynikowej odpowiada inna składowa prądu twornika, inna moc czynna i bierna. Daje to możliwość utworzenia zależności $J = f(P)$ lub $Q = f(P)$ przy $i_m = \text{const}$ i $U = \text{const}$.

Dla danych: $P = \text{const}$, $i_m = \text{const}$ i $U = \text{const}$ otrzymujemy na krzywej wynikowej (rys. 8) punkt, który określa jednoznacznie prąd twornika maszyny J , jej współczynnik mocy $\cos \varphi$, moc bierną Q itd. Z ostatniego stwierdzenia wynika sposób określenia parametrów pracy maszyny przy danych wielkościach: mocy czynnej, prądzie wzbudzenia i napięciu (P, i_m, U).

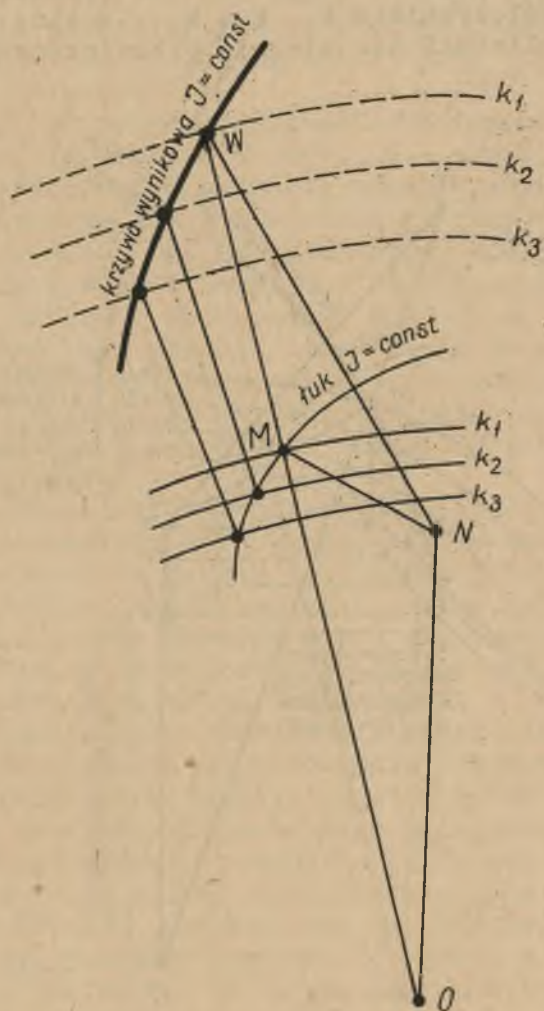
Sposób wyznaczania parametrów maszyny przy danych: mocy czynnej, mocy biernej i napięciu (P, Q, U) wynika wprost z wykresu. Nie będziemy go opisywali.

Wyrazimy tu ogólne spostrzeżenie. Znajomość trzech parametrów spośród grupy: $(J, U, \varphi, i_m, E_{sz}, \mathcal{J})$ lub: $(P, Q, U, i_m, E_{sz}, \mathcal{J})$ jest warunkiem wystarczającym dla określenia pozostałych wielkości.

Analizując wykres na rysunku 7 nie zastanawialiśmy się jeszcze nad wykreślnym sposobem wyznaczania charakterystyk maszyny w funkcji częstotliwości. Można łatwo zauważyć, że wykres daje się wykorzystać także i do tego celu. Przypatrzwszy się wykresowi stwierdzimy, że wielkość odcinków \overline{OM} , \overline{NW} , \overline{MN} nie zależy w sposób bezpośredni od zmian częstotliwości (wykluczamy tutaj zmiany pośrednie odcinków przy $f = \text{variabilis}$ wynikające z ogólnej zmiany parametrów maszyny).



Rys. 9. Sposób wyznaczenia charakterystyki $J = f(i_m)$ lub $Q = f(i_m)$ przy danych $P = \text{const}$ i $U = \text{const}$ (krzywa Mordaya)



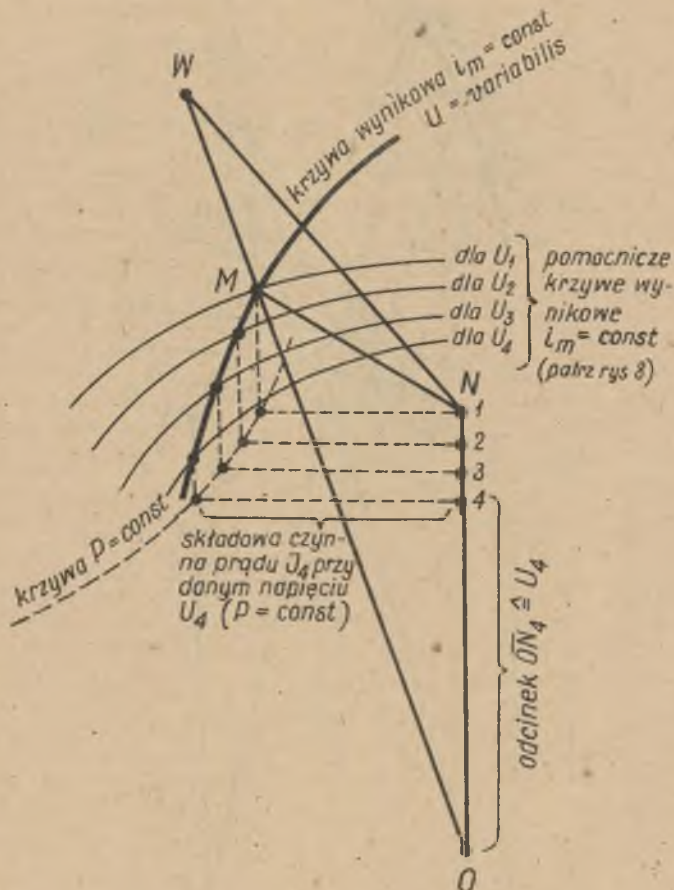
Rys. 10. Sposób wyznaczenia charakterystyki $i_m = f(P)$ przy danych: $J = \text{const}$ i $U = \text{const}$

Wyjaśnimy tę rzecz na przykładzie. Odcinek

$$\overline{OM} \hat{=} \frac{E_{sz}}{X_r} \hat{=} \frac{k \cdot a \cdot i_w}{X_r}$$

Wyrażenie $\frac{k \cdot a \cdot i_w}{X_r}$ nie zmienia swej wartości przy zmianach f , ponieważ jego licznik i mianownik są zależne od f w pierwszej potędze. Wyciągamy stąd ważny wniosek, że miej-

sca geometryczne łuków $r = \overline{OM}$ i $r = \overline{OW}$ odpowiadające określonym współczynnikom k_1, k_2, k_3, \dots itd. w miarę zmiany częstotliwości nie ulegają przemieszczeniu na wykresie.



Rys. 11. Sposób wyznaczenia charakterystyki $J = f(U)$ lub $Q = f(U)$ przy danych: $P = \text{const}$ i $i_m = \text{const}$ (charakterystyka zewnętrzna)

W odróżnieniu od odcinków: \overline{OM} , \overline{MW} , \overline{MN} odcinki \overline{ON} , \overline{WN} zmieniają swą długość odwrotnie proporcjonalnie do zmian f (w stosunku $\frac{1}{f}$). Obniżenie częstotliwości przy $U = \text{const}$ i $i_m = \text{const}$ daje w efekcie odwrotnie proporcjonalne zwiększenie odcinków \overline{ON} , \overline{WN} . Oznacza to, że przy obniżeniu częstotliwości zwiększają się na wykresie skale prądu wzbużenia i napięcia (skale odpowia-

dające: i_m, U, E_{sz}) i odwrotnie. Na tym opieramy sposób sporządzania charakterystyk w funkcji częstotliwości (w szczególności: $J = F(f), E_{sz} = F(f)$ przy $P = \text{const}, U = \text{const}, i_m = \text{const}$).

Opiszemy dla przykładu sposób wyznaczenia charakterystyki $J = F(f)$ przy $P = \text{const}, U = \text{const}, i_m = \text{const}$ (rys. 12). Zachowując przyjęte zasady posługiwania się wykresem dopasowujemy odpowiednio do danej wielkości f' długości odcinków: ON, WN . Dla każdej nowej wartości f' określamy na wykresie nowy punkt N' . Z punktu N' zakreślamy łuk o długości dopasowanej do $f' - r' = WN'$. Znajdujemy na tym łuku punkt W' . Wskazówką do znalezienia punktu W' jest oczywiście warunek, że przyporządkowany punktowi W' punkt M' musi leżeć na danej prostej $P = \text{const}$. Odcinek $N'M'$ określa wartość prądu J' odpowiadającą przyjętej f' .

Dokładność metody wykreślnej stawiającej za cel wyznaczenie parametrów lub charakterystyk maszyny synchronicznej w oparciu o wykres na rysunku 7 zależy od dokładności pomiaru charakterystyki biegu jałowego i oporności X_r i X_{ad} oraz od przyjętych skal napięcia i prądów na wykresie. Im większe przyjmiemy skale na wykresie, tym większą uzyskamy dokładność.

Wykres konstruujemy zawsze dla częstotliwości $f = 50$ Hz. Nie wyklucza to oczywiście możliwości określania charakterystyk w funkcji częstotliwości.

Aby bez specjalnych przeliczeń wyznaczać potrzebne do konstrukcji wykresu promienie łuków odpowiadające stałemu nasyceniu żelaza maszyny ($k = \text{const}$ - odcinki: OM, OW lub OM, MW), sporządzamy na podstawie charakterystyki biegu jałowego pomocniczy wykres $k = f(\dot{E}_{sz})$ i $m = f(\dot{E}_{sz})$. Wielkości m odpowiada na wykresie (rys.7) odcinek MW . Wyrażamy ją wzorem:

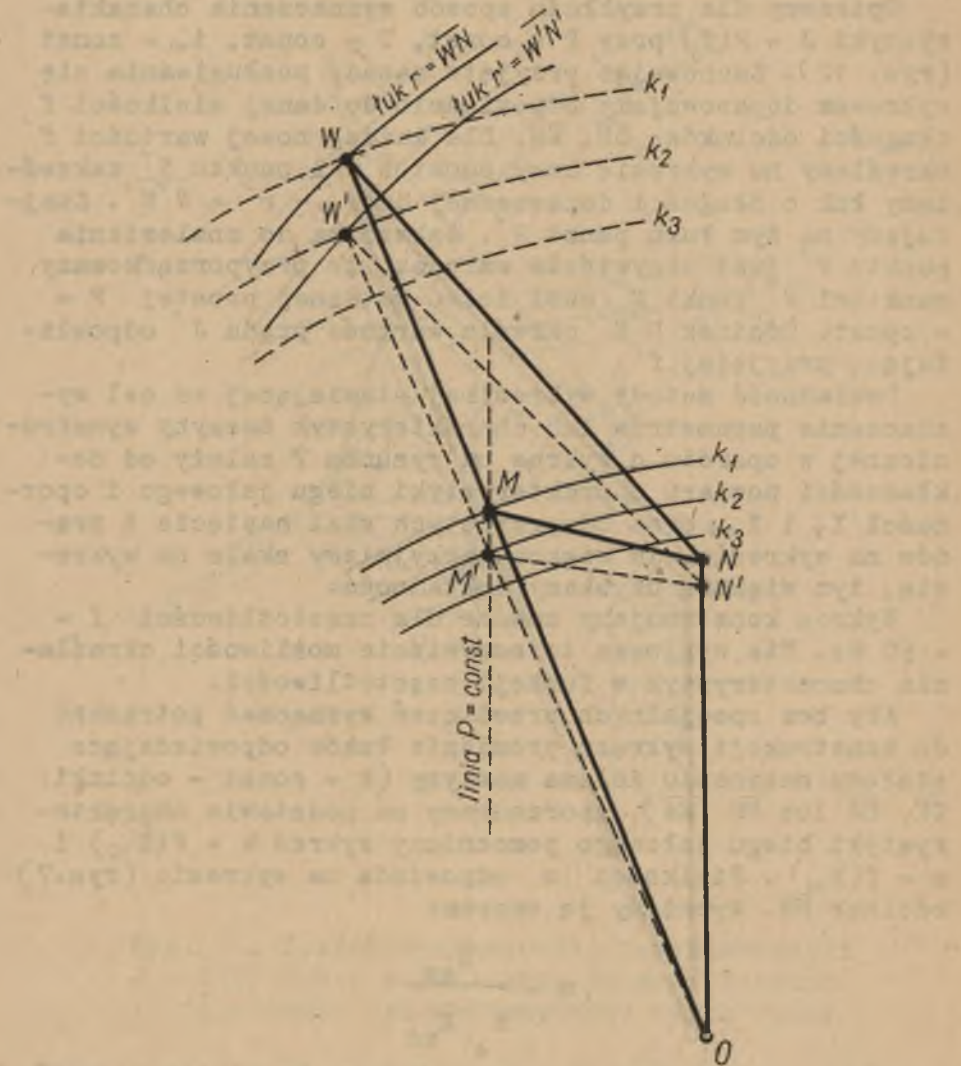
$$m = \frac{\dot{E}_{sz}}{k \dot{X}_{ad}}$$

Wykres pomocniczy podajemy na rysunku 13. Krzywa $m=f(\dot{E}_{sz})$ jest właściwie odwróconą w układzie współrzędnych charakterystyką biegu jałowego

$$m = \frac{\dot{i}_w}{\dot{X}_{ad}}$$

stąd

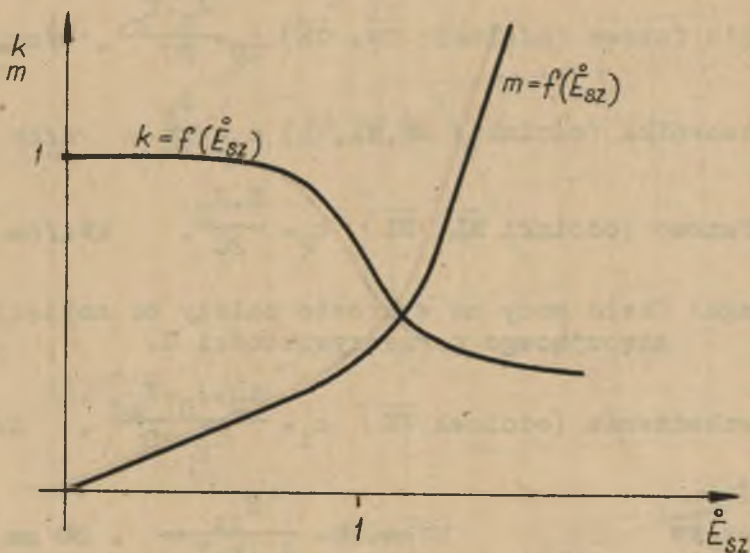
$$m \cdot \dot{\bar{X}}_{ad} = \dot{i}_w = f(\dot{E}_{sz})$$



Rys. 12. Sposób wyznaczenia charakterystyki $J=F(f)$ przy danych: $P=\text{const}$, $U = \text{const}$ i

$$i_m = \text{const}$$

Dążąc do uzyskania jak największej dokładności staramy się tak dobrać skale wykresu, aby każdemu znamionowemu parametrowi maszyny na wykresie odpowiadały odcinki o długości co najmniej 10 - 15 cm. Spełnienie tego warunku osiągamy wtedy, jeżeli jednostce względnej (l) przyporządkujemy na wykresie odcinek o długości 20 cm ($l \hat{=} = 20$ cm).



Rys. 13. Wykres pomocniczy

Wówczas zależności pomiędzy odcinkami na wykresie a wielkościami rzeczywistymi (określonymi w jednostkach względnych) przedstawiają się następująco (patrz rys.7):

jednostka względna		$l \hat{=} 20$ cm
prąd twornika	$\overline{NM} = \dot{J} \cdot \frac{20}{X}$ cm	$J_N \hat{=} 20$ cm
napięcie	$\overline{ON} = \dot{U} \cdot \frac{20}{X_r}$ cm	$U_N \hat{=} 180-220$ cm
SEM-na w szczelinie	$\overline{OM} = \dot{E}_{sz} \cdot \frac{20}{X_r}$ cm	$E_{szN} \hat{=} 195 - 235$ cm
moc czynna (składowa czynna prądu)	$\overline{ML} = \dot{P} \cdot \frac{20}{U}$ cm	$P_N \hat{=} 14-17$ cm

moc bierna (składowa bierna prądu) $\overline{LN} = \dot{Q} \cdot \frac{20}{U}$ cm $Q_N \hat{=} 10-15$ cm

wielkość m $\overline{MW} = m \cdot 20$ cm $m_N \hat{=} 12-20$ cm

Jeżeli konstruujemy wykres bez użycia jednostek względnych, wówczas stosujemy następujące skale:

napięcie fazowe (odcinki: $\overline{ON}, \overline{OM}$) $c_U = \frac{J_N \cdot X}{20} \cdot \frac{V}{cm}, \text{ kV/cm}$

prąd twornika (odcinki: $\overline{NM}, \overline{ML}, \overline{NL}$) $c_J = \frac{J_N}{20} \cdot \frac{A}{cm}$

moce fazowe (odcinki $\overline{ML}, \overline{NL}$) $c_P = \frac{U \cdot J_N}{20}, \text{ kVA/cm}, \text{ MVA/cm}$

Uwaga: Skala mocy na wykresie zależy od napięcia występującego w rzeczywistości U.

prąd wzbudzenia (odcinek \overline{WN}) $c_{I_1} = \frac{i_N \cdot J_N \cdot X_{ad}}{U_N \cdot 20}, \text{ A/cm}$

odcinek \overline{MW} $\overline{MW} = m \cdot 20 = \frac{E_{sz}}{J_N \cdot k \cdot X_{ad}} \cdot 20 \text{ cm}$

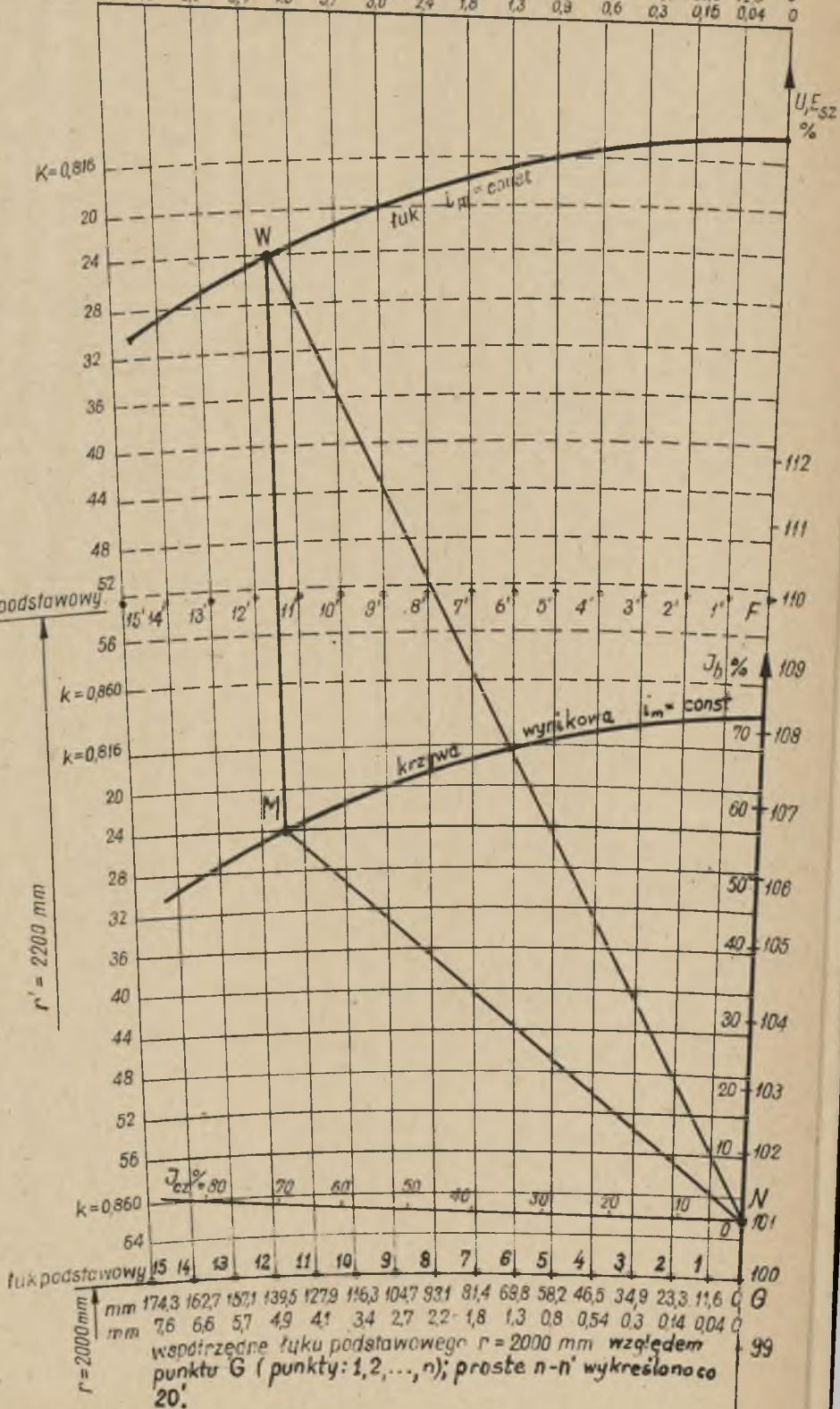
Użycie skali ($i \hat{=} 20$ cm) pozwala co prawda na zwiększenie dokładności, ale z drugiej strony utrudnia dodatkowo konstrukcję wykresu (dla tak dobranych skal wykres wypada bardzo duży - trudno jest wykreślić łuki $k = \text{const}$, które w tym wypadku osiągają zbyt wielkie promienie). Najlepszym rozwiązaniem w tej sytuacji jest skonstruowanie tylko części wykresu, która by objęła obszar zmian parametrów maszyny spotykany w praktyce. W tym celu zaniedbujemy dolną część wykresu z punktem O i ograniczamy się tylko do pokazania trójkątów $\triangle NMV$ i $\triangle NML$ w obszarze położonym blisko napięcia znamionowego. Odrzucamy w ten sposób większą, niepotrzebną część wykresu; pozostałą możemy zwykle zmieścić na formacie papieru A-3.

Konstrukcję łuków odpowiadających stałemu nasyceniu żelaza $k = \text{const}$ epieramy o dwa dowolnie obrane łuki podstawowe (rys. 14). Łuków podstawowych nie wykreślamy cyrklem, lecz wyznaczamy je analitycznie za pomocą

Współrzędne łuku podstawowego $r' = 2200$ mm względem punktu F (punkty: 1', 2', ..., n')

mm	191,7	179,0	166,2	153,5	140,7	127,9	115,1	102,4	89,6	76,8	64,0	51,2	38,4	25,6	12,8	0
mm	8,4	7,3	6,3	5,4	4,5	3,7	3,0	2,4	1,8	1,3	0,9	0,6	0,3	0,16	0,04	0

$P_{PN} = 43,75$ MVA, $P_N = 35$ MW, $U_N = 10,5$ kV, $L_{mN} = 450A$, $i_N = 171A$, $X_{gd} \% = 60\%$
 $X_r \% = 10\%$
 100% skala J_{cz}, J_b
 50% skala U, E_{sz}
 4% skala U, E_{sz}
 3% skala U, E_{sz}
 2% skala U, E_{sz}
 1% skala U, E_{sz}
 50% skala U, E_{sz}
 100% skala $i_m (100\% \hat{=} i_N)$



współrzędne łuku podstawowego $r = 2000$ mm względem punktu G (punkty: 1, 2, ..., n); proste n-n' wykreślono co 20'.

Rys. 14. Fragment wykresu o masie F

współrzędnych biegunowych ($r \sin \alpha$, $r \cos \alpha$). Odpowiadające tym samym kątom (α) punkty 1, 2, 3, ..., n i 1', 2', 3', ..., n' na łukach podstawowych łączymy liniami prostymi (przecinającymi się daleko poza rysunkiem w punkcie O) Proste te wskazują kierunek odcinków \overline{MW} .

Na prostych w odpowiedniej odległości od dolnego łuku podstawowego w górę nanosimy punkty odpowiadające danemu łukowi $k = \text{const}$. Łącząc punkty linią zakreśloną za pomocą krzywki otrzymujemy konstruowany łuk $k = \text{const}$. Łuki $k = \text{const}$ powinny być konstruowane dla wartości k stopniowanych, np.: co 0,004 lub 0,005, przy czym łuki odpowiadające promieniowi OM można wyciągnąć linią ciągłą, a łuki odpowiadające promieniowi OW linią przerywaną lub kolorową.

Proste 1-1', 2-2', ..., n-n' należy tak zagęścić na wykresie, aby konstrukcja krzywej wynikowej za pomocą tych prostych była łatwa i możliwie najdokładniejsza (proste prowadzimy co 20' lub 30').

Dla zwiększenia dokładności wykresu (rys. 14) jest wskazane, aby charakterystyka biegu jałowego w przedziale $U_N - 5\% < E_{sz} < U_N + 15\%$ była wyznaczona z pomiaru w oparciu o jak największą ilość punktów.

LITERATURA

- [1] В.В. Е н ь к о, Обобщенная векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины и её применение, Электричество 4, 1951.

Резюме

ГРАФИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ СТАЛИ

Характеристику холостого хода синхронной машины $E = f(i)$ представлено в виде $E = kai$, принимая для этого два коэффициенты, из которых один рассматривает простолинейную часть, $a = \text{const}$, другой - нелинейную, из-за насыщения стали $k = k(i)$. Этот приём позволил видоизменить векторную диаграмму неявнополюсной синхронной машины с учетом насы-

щения. Эту диаграмму можно применить для графического построения произвольных характеристик машины. Подаются способы определения некоторых характеристик, а также формулу для тока возбуждения насыщенной машины в зависимости от других параметров.

Résumé

SOLUTION GRAPHIQUE DES CARACTERISTIQUES D'UNE MACHINE SYNCHRONE SATURÉE

L'auteur propose une nouvelle application de la caractéristique à ride d'une machine synchrone en introduisant deux coefficients numériques, un pour les relations linéaires, l'autre pour l'effet de saturation de fer. Après une modification du graphique de routine, l'auteur démontre l'usage de la méthode pour des solutions des caractéristiques statiques quelconques d'une machine synchrone. A titre d'exemple l'auteur démontre la détermination du courant d'excitation pour une machine saturée.