

Zdzisław Konopka

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

**ANALITYCZNO-GRAFICZNA METODA WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK  $n = f(I)$   
SZEREGOWEGO SILNIKA TRAKCYJNEGO LOKOMOTYWY SPALINOWEJ**

**Streszczenie.** Zaproponowana w pracy metoda wykreślenia rodziny charakterystyk  $n = f(I)$  silnika trakcyjnego przy różnych (stałych w funkcji obciążenia) wartościach napięcia zasilającego, pozwala także na wykreślenie tej charakterystyki dla zmieniającego się napięcia w funkcji obciążenia, a więc charakterystyk:  $n = f[I, U(I)]$ . Metoda ta może być przydatna przy wyznaczaniu charakterystyk rozruchowych lokomotywy spalinowej.

**1. Wstęp**

Projektowanie napędów trakcyjnych wymaga między innymi znajomości przebiegów charakterystyk prędkości silnika w funkcji prądu obciążenia  $n=f(I)$ , dzięki którym można z kolei wyznaczyć charakterystykę trakcyjną pojazdu  $F = f(v)$ .

Zależność  $n = f(I)$  określona jest wzorem

$$n = \frac{U - I R_a}{c \Phi} \quad (1)$$

gdzie

- $n$  - prędkość obrotowa silnika,
- $U$  - napięcie zasilające silnik,
- $I$  - prąd obciążenia,
- $R_a$  - rezystancja silnika,
- $\Phi$  - strumień magnetyczny,
- $c$  - stała.

Z równania (1) wynika, że przy stałej wartości rezystancji silnika  $R_a$  oraz dla dowolnej wartości prądu  $I$ , prędkość obrotowa jest proporcjonalna do napięcia zasilającego  $U$ . Jeśli napięcie ma wartość stałą, a zmienia się rezystancja  $R_a$ , wówczas dla dowolnej, stałej wartości prądu  $I$ , prędkość obrotowa  $n$  jest prostoliniową zależnością tej rezystancji.

Powyższe własności umożliwiają graficzne wyznaczenie przebiegu charakterystyk  $n = f(I)$  przy stałej wartości rezystancji  $R_a$  i różnych warto-

ściach napięć zasilających, bądź też przy stałym napięciu i różnych wartościach rezystancji  $R_g$ . Metody graficznego wyznaczania rodziny omawianych charakterystyk są ogólnie znane i opisane w literaturze [1].

Autor proponuje jeszcze jeden sposób graficznego wyznaczania rodziny charakterystyk  $n = f(I)$  przy stałej wartości rezystancji  $R_g$  i różnych wartościach napięcia zasilającego. W oparciu o tę metodę wyznaczono przebieg charakterystyki prędkości w funkcji prądu obciążenia dla silnika pracującego w układzie przekładni elektrycznej, gdzie prędkość obrotowa  $n$  jest bardziej złożoną funkcją prądu  $I$ , ponieważ silniki pracują przy zmieniającym się wraz z prądem, napięciu zasilającym.

Prześledźmy konstrukcję charakterystyk  $n = f(I)$  dla silnika zasilanego z sieci trakcyjnej oraz charakterystyk  $n = f[I, U(I)]$  dla silnika pracującego w układzie przekładni elektrycznej.

## 2. Zasilanie silnika z sieci trakcyjnej

Charakterystyki  $n = f(I)$  dla dowolnych napięć zasilających sporządzamy w oparciu o charakterystykę naturalną, a więc wyznaczoną dla silnika zasilanego napięciem znamionowym. Charakterystykę naturalną uważamy za znaną, ponieważ można wyznaczyć ją wykreślnie [2], ewentualnie analitycznie, wstawiając we wzorze (1) w miejsce napięcia  $U$  wartość znamionową napięcia  $U_N$ .

Otrzymamy wówczas

$$n = \frac{U_N - I R_g}{c \phi} \quad (2)$$

Prędkość obrotową dla napięć różnych od znamionowego można wyrazić wzorem

$$n = \frac{k U_N - I R_g}{c \phi} \quad (3)$$

gdzie

$$k = \frac{U}{U_N}$$

$U$  - napięcie, przy którym wyznaczana jest charakterystyka.

Dla stałej wartości prądu obciążenia prędkość obrotowa  $n$  jest więc liniową funkcją współczynnika  $k$  lub odwrotnie, współczynnik  $k$  jest liniową funkcją prędkości obrotowej, opisaną równaniem prostej

$$k = c n + d.$$

Dla poszczególnych wartości prądu  $I$  dostaniemy pęk prostych

$$k = f(n) \quad \text{przy} \quad I_1, I_2, \dots, I_n = \text{const}, \quad (4)$$

które narysujemy znając przynajmniej dwa punkty charakterystyczne dla każdej prostej.

Przykładowo: dla prądu  $I_1$  (rys. 1) pierwszy punkt charakterystyczny  $a_1$  będzie miał współrzędną  $n_1$  odpowiadającą prądowi  $I_1$  na charakterystyce  $n = f(I)$  oraz współrzędną  $k = 1$ .

Drugi punkt charakterystyczny  $b_1$  wyznaczamy z zależności (3) dla prędkości  $n = 0$

$$b_1 = k_{n=0} = \frac{I_1 R_s}{U_N}$$

i zaznaczamy go na osi  $k$  układu współrzędnych  $k, n$ .

Prosta  $k = f(n)_{I=I_1=\text{const}}$  będzie przechodziła przez punkty  $a_1$  i  $b_1$ .

Podobnie wyznaczmy proste

$$k = f(n)_{I_2=\text{const}}, \quad k = f(n)_{I_1=\text{const}}, \quad \dots \quad k = f(n)_{I_n=\text{const}}$$

Punkty charakterystyczne leżące na osi  $k$  określone będą zależnościami

$$b_i = \frac{I_i R_s}{U_N} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

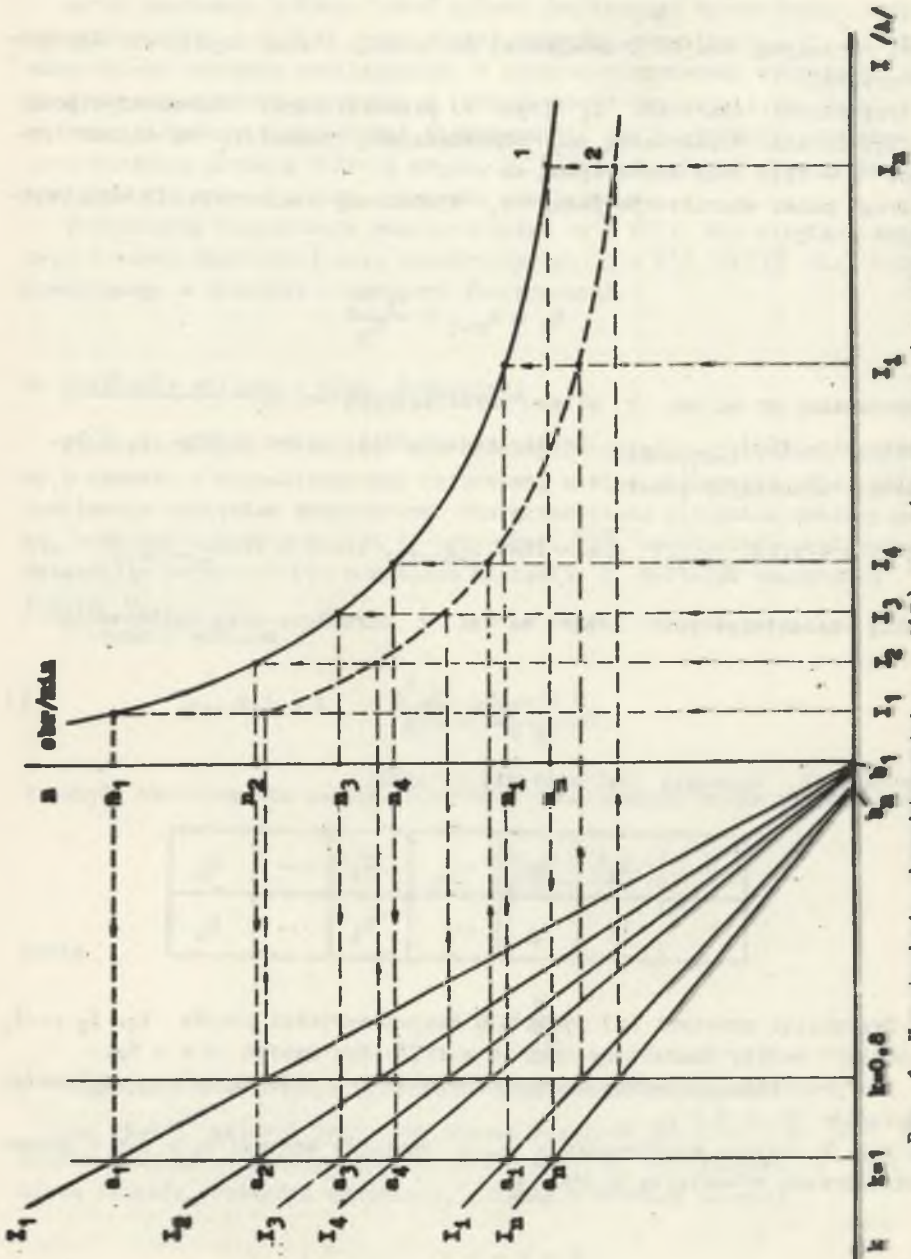
Wartości  $b_i$  wygodnie jest zestawzić w tabeli

$I$	$I_1$	$I_2$	...	$I_i$	...	$I_n$
$b$	$b_1$	$b_2$	...	$b_i$	...	$b_n$

Dysponując prostymi (4) można dla danych wartości prądów  $I_1, I_2 \dots I_n$  wyznaczyć punkty charakterystyki  $n = f(I)$  dla napięć  $U = k U_N$ .

Dla przykładu wyznaczmy charakterystykę  $n = f(I)$  silnika zasilanego napięciem  $U_1 = 0,8 U_N$ .

Na osi  $k$  układu współrzędnych  $k, n$  odcinamy wartość  $k_1 = 0,8$  i prowadzimy prostą równoległą do osi  $n$ .



Rys. 1. Konstrukcja charakterystyk  $n = f(I)$  dla różnych napięć zasilaających  
 1) charakterystyka dla napięcia znamionowego, 2) wyznaczona charakterystyka dla  $U = k U_N$

Punkty przecięcia pęku prostych  $k = f(n)_{I_1 = \text{const}}$  z prostą  $k_1 = 0,8 = \text{const}$ , odniesione do układu współrzędnych  $n, I$  wyznaczają, dla odpowiednich wartości prądu obciążenia, punkty szukanej charakterystyki (rys. 1).

Analogicznie dla dowolnej innej wartości napięcia zasilającego  $U_2$ , rysujemy prostą

$$k_2 = \frac{U_2}{U_N} = \text{const}$$

i podobnie jak poprzednio wyznaczamy punkty szukanej charakterystyki.

### 3. Praca silnika trakcyjnego w układzie przekładni elektrycznej

Jak już wspomniano na wstępie, prędkość obrotowa silnika trakcyjnego, pracującego w układzie przekładni elektrycznej, jest funkcją dwóch zmiennych: prądu obciążenia  $I$ , oraz napięcia zasilającego  $U$ . Dla wykreślenia charakterystyk  $n = f[I, U(I)]$  będzie więc konieczna znajomość charakteru zmian napięcia oraz jego wartości przy poszczególnych prądach obciążenia. Musimy zatem dysponować charakterystykami zewnętrznymi prądnicy oraz charakterystykami stałej mocy silnika wysokoprężnego dla poszczególnych stopni jazdy określonych położeniem nastawnika, wykreślonymi w układzie współrzędnych  $U, I$ . Charakterystyka pracy prądnicy głównej przekładni elektrycznej  $U_G = f(I_G)$  podana jest na rys. 2.

Wyznamy charakterystykę  $n = f(I)$  przy stałej wartości napięcia zasilającego silnik, jako pomocniczą dla wykreślenia charakterystyk rzeczywistych. Normalnie charakterystyka ta jest dana dla napięcia znamionowego, odpowiadającego punktowi pracy ciągłej silnika. Założmy więc, że punktowi pracy ciągłej odpowiada napięcie  $U_{M4}$  (rys. 2), przy czym

$$U_{M4} = \frac{U_{G4}}{n},$$

gdzie

$U_{M4}$  - napięcie silnika,

$U_{G4}$  - napięcie prądnicy,

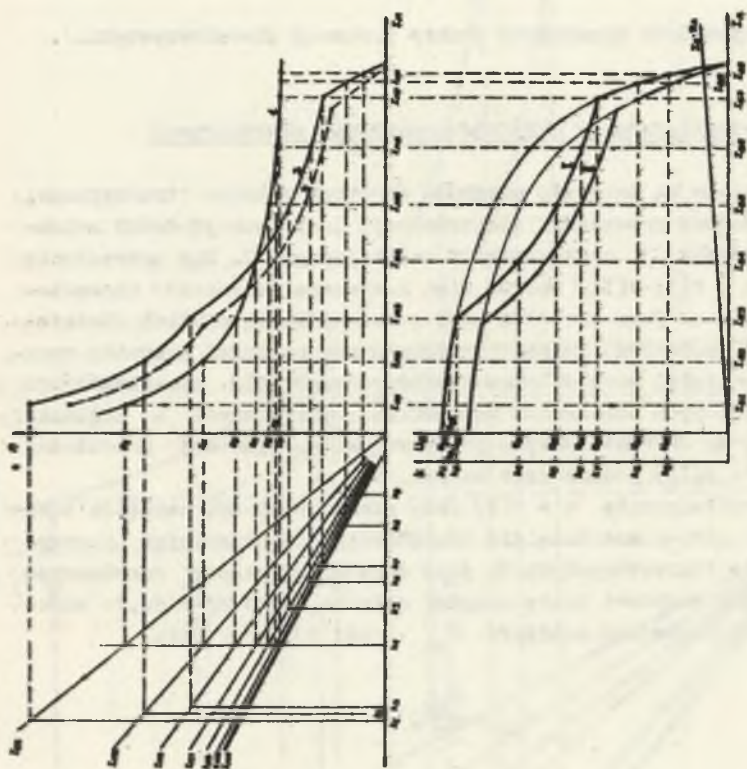
$n$  - ilość silników w gałęzi równoległej.

Charakterystykę  $n = f(I)_{U_{M4} = \text{const}}$  przedstawia krzywa 1 na rys. 2.

Poszczególnym prądom  $I_{G1}, I_{G2}, \dots, I_{Gn}$  prądnicy głównej odpowiadają prądy  $I_{M1}, I_{M2}, \dots, I_{Mn}$  silnika trakcyjnego, które wyznaczymy z zależności

$$I_M = \frac{I_G}{m},$$

gdzie  $m$  - ilość gałęzi równoległych.



Rys. 2. Konstrukcja charakterystyk  $n = f(I)$  dla zmieniających się w funkcji obciążenia napięcie zasilaających

I - charakterystyka  $U_G = f(I_G)$  dla ostatniego położenia nastawnika jazdy, II - charakterystyka  $U_G = f(I_G)$  dla przedostatniego położenia nastawnika jazdy

1) charakterystyka  $n = f(I)$  dla  $U_{M4} = \text{const}$ , 2) charakterystyka  $n = f(I)$  dla przypadku I, 3) charakterystyka  $n = f(I)$  dla przypadku II

Skalę prądu  $I_G$  oraz prądu  $I_M$  dobrano w ten sposób, aby prądowi  $I_{G1}$  w układzie współrzędnych  $U_G, I_G$  odpowiadał prąd  $I_{M1}$  w układzie współrzędnych  $n, I_M$ .

Przyjmując

$[i_G]$  - współczynnik skalowy prądu generatora w mm/A,

$[i_M]$  - współczynnik skalowy prądu silnika w mm/A,

napiszemy

$$[i_G] I_G = [i_M] I_M.$$

Ponieważ

$$I_M = \frac{I_G}{m},$$

napiszemy

$$m[i_G] = [i_M].$$

Tak więc współczynnik skalowy prądu  $I_M$  jest  $m$  razy większy od współczynnika skalowego prądu  $I_G$ .

Przy tak przyjętej skali można bezpośrednio przenosić wartości prądów  $I_G$  na oś prądów  $I_M$ .

Konstrukcja charakterystyk  $n = f(I)$ , uwzględniających zmienność napięcia zasilającego silnik trakcyjny, jest podobna do poprzedniej. Analogicznie jak w punkcie 2 należy wyznaczyć pęk charakterystyk

$$k = f(n) \quad \text{dla} \quad I_{M1}, I_{M2}, \dots, I_{Mn} = \text{const.}$$

Współczynnik  $k$  nie będzie miał jak poprzednio wartości stałej, lecz dla zmieniających się prądów obciążenia, będzie każdorazowo przybierał wartości

$$k_1 = \frac{U_{M1}}{U_{M4}} = \frac{U_{G1}}{n} \frac{n}{U_{G4}} = \frac{U_{G1}}{U_{G4}}, \quad (6)$$

gdzie

$U_{G1}$  - napięcie odpowiadające  $i$ -tej wartości prądu  $I_G$ .

Wartości te nanosimy na oś  $k$  układu współrzędnych  $k, n$ .

Wartości współczynnika  $k$  można też wyznaczyć bezpośrednio, rysując równoległe do osi  $U_G$  układu współrzędnych  $U_G, I_G$  oś  $k$ , przy czym skalę współczynników  $k$  należy dobrać w ten sposób, aby napięciu  $U_{G4}$  odpowiadała wartość  $k = 1$ .

Poszczególne wartości  $k_2, k_3, \dots, k_n$  będą wówczas odpowiadały napięciom  $U_{G2}, U_{G3}, \dots, U_{Gn}$ .

Dysponując tak wykreślonymi charakterystykami pomocniczymi  $k = f(n)$  oraz charakterystyką  $n = f(I)_{U_{M1} = \text{const}}$ , można przystąpić do konstrukcji charakterystyki  $n = f[I, U(I)]$ .

Prądowi  $I_{G1}$  (rys. 2) odpowiada

- napięcie  $U_{G1}$ ,
- prąd  $I_{M1}$ ,
- napięcie  $U_{M1}$ ,
- prędkość  $n_1$  na charakterystyce  $n = f(I)_{U_{M1} = \text{const}}$  (krzywa 1 rys. 2),
- współczynnik  $k_1 = \frac{U_{G1}}{U_{G4}}$ .

Punkt odpowiadający prądowi  $I_{M1}$  na charakterystyce 1 (prędkość  $n_1$ ) przenosimy wzdłuż prostej  $k = f(n)_{I_{M1} = \text{const}}$  do punktu przecięcia się jej z prostą  $k_1 = \text{const}$ .

Punkt przecięcia się tych prostych, odniesiony do układu  $n, I$  jest dla prądu  $I_{M1}$  szukanym punktem charakterystyki 2.

Analogicznie postępujemy przy wyznaczaniu dalszych punktów charakterystyki 2 odpowiadających prądom  $I_{Mi}, i = 1, 2, \dots, n$ , wykorzystując proste  $k = f(n)_{I_{Mi} = \text{const}}$  oraz proste  $k_i = \text{const}$ .

Na rys. 2 wykreślono również przebieg charakterystyki  $n = f[I, U(I)]$  dla przedostatniego stopnia jazdy krzywa 3, przy czym zaznaczono tylko charakterystyczne punkty nie opisując ich oraz nie rysując linii pomocniczych.

#### 4. Uwagi końcowe

Zaletą opisaną metody jest to, że nie wymaga wyznaczania poszczególnych punktów charakterystyki na podstawie zależności (1). Przy odpowiedniej ilości wyznaczonych charakterystyk, uzależnionej ilością pozycji nastawnika jazdy, w celu poprawienia czytelności rysunku, korzystnym jest wykreślać charakterystyki na papierze milimetrowym. Można wówczas zrezygnować z linii pomocniczych i zaznaczać tylko charakterystyczne punkty.



LITERATURA

1. Jaworski Cz.: Teoria trakcji elektrycznej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1956.
2. Gcgolewski Z., Kuczewski Z.: Napęd Elektryczny. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.
3. Podoski J.: Zasady trakcji elektrycznej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1967.

АНАЛИТИЧЕСКО-ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК  $n = f(I)$  ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДИЗЕЛЬ - ЛОКОМОТИВА

Резюме

В статье предложен метод построения диаграммы семейства характеристик  $n = f(I)$  тягового двигателя посроанного тока при разпигных (постоянных в функции нагрузки) значениях напряжения питания. Этот метод позволяет также построить диаграмму этой характеристики для изменяющегося вместе с нагрузкой напряжения т.е. характеристики  $n = f[I, U(I)]$ .

Метод может быть использован при определении пусковых характеристик электровозов и дизель-локомотивов.

THE ANALYTIC-GRAPHIC METHOD FOR DETERMINING  $n=f(I)$  CHARACTERISTIC IN DIESEL LOCOMOTIVE RAILWAY SERIES MOTOR

Summary

The analytic-graphic method for deterining family of  $n = f(I)$  characteristics in diesel locomotive railway series motor with various (but constant as a load function) supply voltages is presented.

The method allows also to determine the characteristic for voltage variable in load function.

The method may be useful for determining diesel locomotive starting characteristic.