

**Wojciech G. Zieliński**  
Politechnika Lubelska, Lublin

## WYZNACZANIE PRĄDU ROZRUCHOWEGO I MOMENTU ROZRUCHOWEGO DLA SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH

### DETERMINATION OF STARTING CURRENT AND STARTING TORQUE FOR ASYNCHRONOUS MOTORS

**Abstract:** Calculation of the starting parameters for three-phase asynchronous motors is a very important issue as these parameters determine whether a motor can be satisfactorily used in a driving system and characterize it from the point of view of supply mains.

The article discusses methods of determining initial starting current and initial starting torque with the omission of issues connected with electromagnetic transient processes, the influence of thermal states, and the effect of parasitic torques.

Direct determination of these parameters is relatively complex, which is why they are often determined in an indirect way. Two methods are described, which allow to establish the aforementioned parameters: the tangent method and the short-circuit reactance distribution method. The methods consist in an extrapolation of short circuit characteristics obtained at reduced voltage.

The results of research and the comparison of parameter calculations refer to two induction motors: squirrel cage and slip ring.

#### 1. Wstęp

Określenie parametrów rozruchowych trójfazowych silników asynchronicznych jest zagadnieniem bardzo ważnym. Znajomość ich decyduje o przydatności silnika do układu napędowego i charakteryzuje go z punktu widzenia sieci zasilającej.

Poniżej omówiono metody wyznaczania początkowego prądu rozruchowego i początkowego momentu rozruchowego przy pominięciu zagadnień związanych z elektromagnetycznymi procesami przejściowymi przy rozruchu, wpływu stanów termicznych oraz oddziaływania momentów pasożytniczych. Określono je w warunkach stanu ustalonego przy zahamowanym wirniku. Wyznaczone w takich warunkach parametry rozruchowe są przedmiotem normalizacji i są podawane w katalogach maszyn elektrycznych. Oblicza się je przy projektowaniu maszyn i mierzy przy ich badaniu. Znajomość tych parametrów jest potrzebna przy projektowaniu układów napędowych.

Artykuł dotyczy zjawisk quasi-stacjonarnych zachodzących podczas rozruchu i oparty jest na metodach obliczeń i pomiarów charakterystyk rozruchowych silników indukcyjnych trójfazowych małej i średniej mocy, zasilanych symetrycznym i sinusoidalnie zmiennym napięciem. Bezpośrednie wyznaczanie parametrów rozruchowych jest dość złożone gdyż wymaga odpowiedniego wyposażenia laboratorium.

W przypadku pomiaru początkowego prądu i momentu rozruchowego przy napięciu znamionowym konieczne jest dostarczenie mocy pozornej kilkakrotnie większej od mocy przy obciążeniu znamionowym. Pomiarów parametrów przy poślizgu  $s = 1$  wymagają urządzeń do obciążania silnika wirującego z określoną prędkością. Szczególne trudności sprawiają badania silników dużej mocy, zwłaszcza szybkoobrotowych. Wskutek tego w wielu przypadkach trzeba uciekać się do metod pośrednich wyznaczania parametrów rozruchowych.

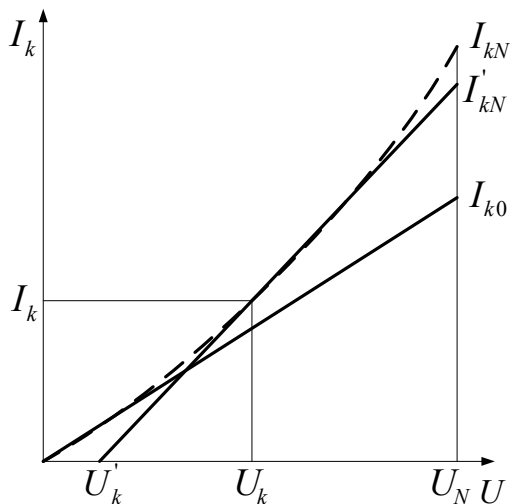
Poniżej opisano dwie metody umożliwiające wyznaczenie tych parametrów polegające na ekstrapolacji charakterystyk zwarcia otrzymanych przy obniżonym napięciu: styczną oraz poprzez podział reaktancji zwarcia. Wyniki badań oraz porównanie obliczeń parametrów przeprowadzono dla dwóch silników indukcyjnych pierścieniowego i klatkowego.

#### 2. Sposoby określania początkowego prądu i momentu rozruchowego

Wartości początkowe prądu i momentu rozruchowego można określić w oparciu o ekstrapolację charakterystyki zwarcia lub na podstawie podziału reaktancji zwarcia [1].

Ponieważ w katalogach podaje się wartości prądu i momentu rozruchowego dla napięcia

znamionowego, istnieje konieczność ekstrapolacji charakterystyk zwarcia. Zalecana jest ekstrapolacja według prostej, stycznej do wyznaczonego odcinka krzywej  $I_k = f(U_k)$  w punkcie, odpowiadającym największemu zmierzonemu napięciu (rys. 1.).



Rys. 1. Ekstrapolacja charakterystyki zwarcia

Na rysunku 1 oznaczono linią przerywaną odcinek wyznaczony z pomiarów oraz pozostałą część charakterystyki natomiast linią ciągłą jej ekstrapolacją wykonaną w punkcie dla napięcia znamionowego.

Prosta ekstrapolacji przecina oś napięć dla wartości  $U'_k$ . Znając współrzędne punktu, w którym przeprowadzono styczną, można obliczyć wartość prądu  $I'_{kN}$  przy napięciu znamionowym  $U_{kN}$  według wzoru 1:

$$I'_{kN} = \frac{U_N - U'_k}{U_k - U'_k} I_k \quad (1)$$

Moment rozruchowy przy napięciu znamionowym obliczono na podstawie znajomości momentu  $T_k$  przy prądzie  $I_k$  zgodnie z zależnością (2):

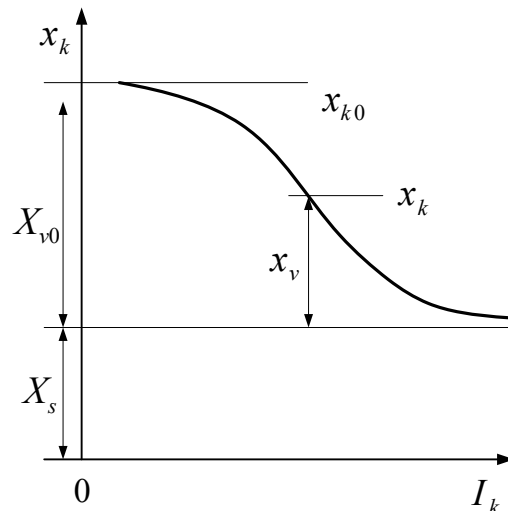
$$T'_{kN} = \left( \frac{I'_{kN}}{I_k} \right)^2 T_k \quad (2)$$

Wynik takiej ekstrapolacji daje wartość  $I'_{kN}$  zależną od tego, w którym miejscu charakterystyki wystawiono styczną. Największe zakrzywienie charakterystyki  $I_k = f(U_k)$  występuje w przedziale prądów zwarcia  $I_k$  od 1,5 do 3,5

prądu znamionowego  $I_N$ . Odpowiada to największemu nachyleniu charakterystyki (rys.1.). Ekstrapolację taką stosuje się w silnikach o małym wpływie nasycenia [2].

Inna metoda wyznaczenia początkowego prądu rozruchowego polega na przeprowadzeniu podziału reaktancji zwarcia  $X_k$  na składniki: stały  $X_s$  i zmienny  $X_g$ .

Określenie tych wielkości wynika z rys.2.

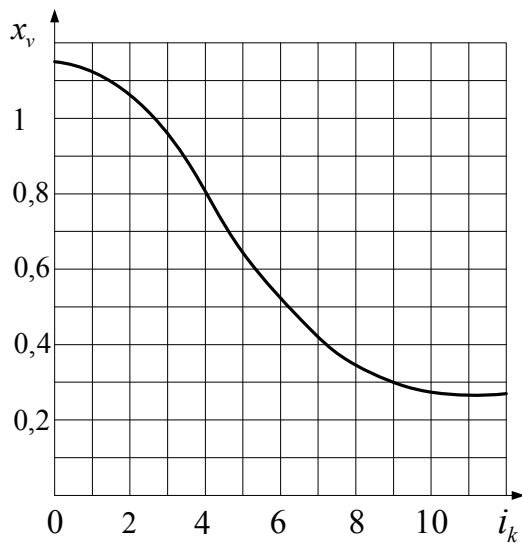


Rys. 2. Przebieg zmian reaktancji zwarcia w zależności od prądu zwarcia i zasada jej podziału na składnik stały i zmienny

Obliczenia wykonano posługując się wartościami względnymi w oparciu o wykres przedstawiony na rys.3.

Celem wyznaczenia reaktancji zwarcia dla prądu znamionowego wykonuje się pomiary w stanie zwarcia dla co najmniej dwóch różnych prądów  $I_{k1}$  oraz  $I_{k2}$ . W dalszej kolejności oblicza się odpowiadające tym wartościom reaktancje zwarcia  $X_{k1}$  i  $X_{k2}$ .

Dla tych samych wartości względnych prądu zwarcia  $i_{k1}$ ,  $i_{k2}$  odniesionych do prądu znamionowego odczytuje się wartości względne reaktancji zwarcia  $x_{k1}$  oraz  $x_{k2}$ .



Rys. 3. Krzywa pomocnicza do obliczania prądu zwarcia przy napięciu znamionowym

Przyjmuje się zmienną część reaktancji zwarcia  $X_{va}$  zgodnie z wzorem (3):

$$X_{va} = \frac{X_{k1} - X_{k2}}{x_{v1} - x_{v2}} \quad (3)$$

Następnie oblicza się względny prąd rozruchowy  $I_{kN}$  określony formułą (4):

$$i_{kN} = 1,2 i_{k2} \frac{U_N}{U_{k2}} \quad (4)$$

gdzie:  $U_{k2}$  jest napięciem zwarcia przy prądzie  $i_{k2}$ .

Wartość współczynnika liczbowego 1,2 dotyczy przypadku, gdy  $i_{k2} \approx 2$ . Z wykresu zamieszczonym na rysunku (3) wyznacza się dla prądu  $i_{kN}$  wartość  $x_{vN}$ .

Reaktancję zwarcia przy napięciu znamionowym  $X_{kN}$  oblicza się ze wzoru (5):

$$X_{kN} = X_{k2} - X_{va}(x_{va} - x_{vN}) \quad (5)$$

Na podstawie pomiarów oblicza się całkowitą rezystancję zwarcia  $R_k$  a znając  $X_{kN}$  można obliczyć prąd rozruchowy  $I_{kN}$  na podstawie zależności (6):

$$I_{kN} = \frac{U_N}{\sqrt{R_k^2 + X_{kN}^2}} \quad (6)$$

### 3. Obliczanie prądu i momentu rozruchowego na podstawie pomiarów

Pomiar początkowego prądu rozruchowego  $I_k$  i początkowego momentu rozruchowego  $T_k$  przeprowadzono w stanie zwarcia [3]. Wykonano je przy dwóch położeniach wirnika względem stojana odpowiadających najmniejszej i największej wartości momentu początkowego, zasilając silnik napięciem obniżonym. Pomiary wykonano przy różnych wartościach napięcia zasilającego  $U_1$  rozpoczynając od wartości największej.

Przedmiotem analizy były dwa silniki asynchroniczne: pierścieniowy typu SZUe 44b i klatkowy typu 2Sg90S4 o danych znamionowych zawartych w tabeli 1.

Tabela 1.

Rodzaj silnika	Silnik klatkowy	Silnik pierścieniowy
$P_N$ [kW]	1,1	3,0
$U_N$ [V]	220/380	220/380
$I_N$ [A]	4,8/2,7	11,8/6,6
$\cos \varphi_N$	0,8	0,82
$n_N$ [ $\frac{obr}{min}$ ]	1415	1420
$T_N$ [Nm]	7,4	20

Do obliczeń wykorzystano następujące dane z próby zwarcia dla silnika klatkowego:

$$I_{k1} = 2,55 A; X_{k1} = 27,4 \Omega; U_{k1} = 82,7 V$$

$$I_{k2} = 3,85 A; X_{k2} = 27,5 \Omega; U_{k2} = 124 V$$

$$R_k = 17,43 \Omega; I_N = 2,7 A; U_N = 380 V.$$

Wartości względnych wartości prądu wynoszą więc:  $i_{k1} = 0,94$ ;  $i_{k2} = 1,43$ .

Z rysunku (3) odczytano wartości  $x_{v1}$  i  $x_{v2}$  dla obliczonych wartości względnych prądów  $i_{k1}$  oraz  $i_{k2}$  i otrzymano  $x_{v1} = 1,08$ ;  $x_{v2} = 0,93$ .

Wówczas:  $X_{v0} = 0,7$ ,  $i_{kN} = 5,25$ ,  $x_{vN} = 0,45$ ,  $X_{kN} = 27,16 \Omega$ .

Zgodnie z zależnością (1) otrzymano początkowy prąd rozruchowy  $I'_{kN} = 11,8 A$  oraz po-

czątkowy moment rozruchowy określony wzorem (2)  $T'_{kN} = 16,9 Nm$ .

Analogicznie dla silnika pierścieniowego otrzymano:

$$I_{k1} = 6,2 A; X_{k1} = 10,96 \Omega; U_{k1} = 73 V$$

$$I_{k2} = 9 A; X_{k2} = 10,86 \Omega; U_{k1} = 105 V$$

$$R_k = 4,14 \Omega; I_N = 6,6 A; U_N = 380 V$$

$$i_{k1} = 0,94; i_{k2} = 1,37$$

$$x_{v1} = 1,08; x_{v2} = 0,93$$

$$X_{v0} = 0,7; i_{kN} = 5,25; x_{vN} = 0,45$$

$$X_{kN} = 27,16 \Omega.$$

Początkowy prąd rozruchowy wynosi więc  $I'_{kN} = 33,3 A$ , natomiast początkowy moment rozruchowy  $T'_{kN} = 47,1 Nm$ .

Wyniki obliczeń początkowego prądu i momentu rozruchowego otrzymane w oparciu o podział reaktancji na składową stałą i zmienną są jednakowe z uzyskanymi powyżej. Potwierdza to poprawność przeprowadzonych obliczeń i świadczy o tym, iż przy wyznaczaniu powyższych parametrów można zastosować dowolną metodę.

#### 4. Wnioski

Istotną trudność stanowi podział reaktancji zwarcia na składniki stały i zmienny. Sposób ten wymaga dokładnych danych pomiarowych. Zwykle przy wykonywaniu pomiarów nie zwraca się uwagi na różnice temperatur uzwojeń silnika w pomiarach stanowiących podstawę ekstrapolacji.

Ekstrapolacja oparta na zbyt bliskich sobie prądach pomiarowych nie daje dobrych wyników. Można wówczas dokonać podziału reaktancji zwarcia na podstawie obliczeń.

Wyniki obliczeń początkowego prądu i momentu rozruchowego obliczone w oparciu o metodę podziału reaktancji zwarcia na składową stałą i zmienną są jednakowe z uzyskanymi na podstawie ekstrapolacji charakterystyki zwarcia. Potwierdza to poprawność przeprowadzonych obliczeń i świadczy o tym, iż przy wyznaczaniu powyższych parametrów można zastosować dowolną metodę.

#### 5. Literatura

[1]. Śliwiński T., Głowacki A.: Parametry rozruchowe silników indukcyjnych, PWN, Warszawa 1982.

[2]. PN – 72/E – 04272. Maszyny elektryczne wirujące. Silniki indukcyjne trójfazowe. Metody badań.

[3]. Latek W.: Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle. WNT, Warszawa 1987.