

Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER

# WYZNACZANIE STRAT I SPRAWNOŚCI TRÓJFAZOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH – – NOWE WYMAGANIA NORM

**STRESZCZENIE**      *W pracy przedstawiono metodę wyznaczania strat i sprawności silników indukcyjnych klatkowych według normy polskiej PN-EN 60034-2-1:2008. Podano wymagania dotyczące dokładności przyrządów, procedurę przeprowadzania badań oraz wyznaczania wartości strat i sprawności. Zwrócono uwagę na nowe elementy wprowadzone w procedurze obliczania strat i sprawności wpływające na dokładność wyznaczania sprawności.*

**Słowa kluczowe:** *straty, sprawność, silniki indukcyjne, wymagania, normy*

## 1. WSTĘP

---

Silniki indukcyjne stosowane w przemyśle zużywają około 30-40% wytwarzanej na świecie energii elektrycznej. Dążenie do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej spowodowało wprowadzanie nowych przepisów, nakazujących stosowanie silników o wyższej sprawności, obowiązujących od 16 czerwca 2011 r. Sposób klasyfikacji sprawności za pomocą klas oraz oznaczeń

---

**dr inż. Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER**  
e-mail: e.ogonowska@iel.waw.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 258, 2012

z nimi związanych podano w międzynarodowej normie IEC 60034-30:2008 [2], która w 2009 r. przyjęta została jako norma polska PN-EN 60034-30 [6]. Dla jednobiegowych, 3-fazowych, klatkowych silników indukcyjnych, zasilanych napięciem do 1000 V o częstotliwości 50 lub 60 Hz, 2-,4- lub 6-biegunowych, o mocach od 0,75 do 370 kW (silniki objęte zakresem normy PN-EN 60034-1 [3]), zdefiniowano klasy sprawności oraz podano ich minimalne wartości. Klasa IE1 to sprawność standardowa, która odpowiada stosowanemu wcześniej oznaczeniu EFF2; klasa IE2 – sprawność wysoka, odpowiadająca EFF1; klasa IE3 – sprawność Premium. Norma wprowadza nową klasę IE4 – Super-Premium, klasyfikującą silniki o najwyższej sprawności, której produkty jeszcze nie są powszechnie dostępne na rynku. Wymagania zawarte w normie PN-EN 60034-30 [5] nie dotyczą silników zasilanych z przekształtników oraz silników zintegrowanych z napędzanymi maszynami, które nie mogą być badane oddzielnie. Producenci są zobowiązani podawać na tabliczkach znamionowych silnika i w dokumentacji klasę sprawności oraz jej wartość.

Poziomy sprawności silników określone w normie PN-EN 60034-30 [6] muszą być wyznaczane metodami przedstawionymi w normie PN-EN 60034-2-1 [5]. Metody te pozwalają wyznaczyć sprawność dokładniej (bliżej wartości rzeczywistej), niż metody stosowane dotychczas oraz charakteryzują się niską niepewnością.

Sprawność silników indukcyjnych może być wyznaczana metodami bezpośrednimi lub pośrednimi. Wybór właściwej metody zależy od wielkości badanego silnika, dostępnego wyposażenia pomiarowo-badawczego oraz wymaganej dokładności wyznaczania sprawności. Względna niepewność wyznaczania sprawności określana jako niska charakteryzuje metodę, w której wszystkie składniki strat wyznaczane są na podstawie badań; średnia odnosi się do metod opartych na ograniczonej liczbie aproksymacji, a wysoka dotyczy metod opartych na założeniach. Wytwórcy zobowiązani są podawać w dokumentacji silnika, jaką metodą wyznaczana jest sprawność, ponieważ porównywane mogą być tylko wartości sprawności wyznaczonych taką samą metodą.

W normie wymienionych jest 10 metod wyznaczania sprawności, bezpośrednich i pośrednich, z których zaleca się wybieranie procedur z najniższą niepewnością.

Metody bezpośrednie polegają na pomiarze mocy elektrycznej lub mechanicznej na wejściu oraz mocy mechanicznej lub elektrycznej na wyjściu maszyny, a sprawność oblicza się stosując wzór (1):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

w którym:  $P_1$  – moc na wejściu,  $P_2$  – moc na wyjściu.

Do metod bezpośrednich zaliczana jest również metoda przeciwsobna z podwójnym zasilaniem, w której dwie identyczne maszyny sprzęgnięte mechanicznie pracują w takich samych warunkach znamionowych; straty całkowite obu maszyn są obliczane jako różnica mocy elektrycznej pobieranej przez jedną maszynę i mocy elektrycznej wydawanej przez drugą maszynę. Sprawność oblicza się ze wzoru:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \quad (2)$$

w którym: straty całkowite  $P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2)$ ,  $P_1$  – moc elektryczna na wejściu jednej maszyny,  $P_2$  – moc elektryczna na wyjściu drugiej maszyny.

Metody pośrednie polegają na wyznaczaniu sprawności poprzez pomiar mocy wejściowej lub wyjściowej i wyznaczaniu strat całkowitych. Sprawność oblicza się według wzoru:

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (3)$$

w którym:  $P_1$  – moc na wejściu,  $P_2$  – moc na wyjściu,  $P_T$  – straty całkowite.

Metoda pośrednia strat poszczególnych z próbą obciążenia jest preferowana do wyznaczania sprawności w maszynach trójfazowych o mocach od 1 do 150 kW. Metoda ta charakteryzuje się niską niepewnością. Straty w uzwojeniu stojana i wirnika wyznaczone są dla rezystancji sprowadzonej do temperatury odniesienia, straty dodatkowe obciążeniowe są wyznaczone na podstawie pomiarów.

## 2. PROCEDURA WYZNACZANIA SPRAWNOŚCI

W Laboratorium Badawczym Maszyn Elektrycznych sprawność silników energooszczędnych o mocach od 1 do 150 kW wyznacza się stosując metodę strat poszczególnych, w której straty całkowite określa się jako sumę strat wyznaczonych na podstawie pomiarów.

### 2.1. Wymagania podstawowe dotyczące badań

Napięcie zasilające podczas pomiarów powinno być równe napięciu znamionowemu silnika, a częstotliwość powinna zawierać się w przedziale  $\pm 0,3\%$  częstotliwości znamionowej.

Dokładność przyrządów pomiarowych wpływa na wartość niepewności wyznaczanej sprawności. W tabeli 1 podano wymagane przez normę PN-EN 60034-2-1 [5] dokładności przyrządów.

**TABELA 1**

Dokładności przyrządów używanych do pomiarów przy wyznaczaniu sprawności silników indukcyjnych

Przyrządy pomiarowe	Dokładność
wielkości elektrycznych	0,2
przekładniki	0,5 lub mniejsza
momentu	$\pm 0,2\%$ pełnej skali
częstotliwości	$\pm 0,1\%$ pełnej skali
prędkości obrotowej	0,1% lub jeden obrót na minutę
temperatury	$\pm 1^{\circ}\text{C}$

W porównaniu z wymaganiami dotyczącymi dokładności przyrządów, zawartymi w stosowanej dotychczas normie PN-EN 60034-2 [4], według której przyrządy pomiarowe i ich wyposażenie powinny mieć klasę dokładności 0,5 lub lepszą, obecnie do wykonywania badań wymagane są przyrządy o większej dokładności.

## 2.2. Sposób przeprowadzania pomiarów

Badania wchodzące w skład procedury pomiarowej powinny być wykonywane w wyznaczonej kolejności. Jeżeli nie będą wykonywane natychmiast jedno po drugim, należy zapewnić zachowanie odpowiednich warunków termicznych, takich jak po próbie obciążenia.

Przed przystąpieniem do prób pod obciążeniem wykonywane są pomiary rezystancji uzwojenia stojana w stanie zimnym silnika oraz pomiary temperatury otoczenia. Następnie wykonywana jest próba nagrzewania przy obciążeniu znamionowym. Na końcu próby nagrzewania, gdy silnik osiągnie stan cieplnie ustalony, wykonywany jest pomiar temperatury uzwojenia. Stosowana dotychczas metoda superpozycji, umożliwiająca pomiar temperatury uzwojenia podczas pracy silnika bez odłączania go od zasilania, nie jest zalecana przez normę PN-EN 60034-2-1 [5]. Temperaturę uzwojenia można wyznaczyć, stosując metodę ekstrapolacji opisaną w PN-EN 60034-1 [3] lub za pomocą wbudowanych czujników temperatury.

Przed rozpoczęciem pomiarów podczas próby obciążenia temperatura uzwojeń powinna różnić się nie więcej niż o 5 K od temperatury osiągniętej podczas próby nagrzewania przy obciążeniu znamionowym. Pomiary należy

przeprowadzić dla sześciu punktów obciążenia silnika, od 25% do 150% mocy znamionowej, zaczynając od obciążenia największego. Należy wybrać dwa punkty w równych odstępach powyżej 100%, ale nie przekraczając 150% obciążenia znamionowego, oraz cztery punkty pomiędzy 25% a 100% obciążenia znamionowego włącznie. Pomiary powinny być wykonywane tak szybko, jak to tylko możliwe, aby ograniczyć zmiany temperatury w maszynie. Należy notować w każdym punkcie: napięcie  $U$ , prąd  $I$ , moc  $P_1$ , rezystancję  $R$  (zgodnie z punktem 5.7.1. normy PN-EN 60034-2-1 [5]), prędkość obrotową  $n$ , częstotliwość  $f$ , moment  $T$ .

Po próbie obciążenia i rozprężeniu silnika od urządzenia obciążającego i ustaleniu się strat jałowych należy wykonać próbę biegu jałowego. Straty biegu jałowego uważa się za ustalone, gdy moc pobierana podczas biegu jałowego różni się nie więcej niż o 3% w dwóch następujących po sobie 30-minutowych odstępach. Pomiary należy wykonać dla co najmniej siedmiu wartości napięcia: dla 4 wartości napięcia, w przybliżeniu równomiernie rozłożonych, między 125% a 60% napięcia znamionowego, w tym również dla napięcia znamionowego, oraz dla trzech wartości, w przybliżeniu równomiernie rozłożonych, między 50% a 20% napięcia znamionowego lub do punktu, w którym prąd dalej się nie zmniejsza. Odczyty należy wykonać w kolejności malejącego napięcia. Należy odczytać i zapisać: napięcie  $U_0$ , prąd  $I_0$ , moc  $P_0$ , rezystancję  $R_0$ , gdzie  $R_0$  jest wyznaczone z pomiaru dla najniższego napięcia.

### 2.2.1. Korekcja odczytów momentu dynamometru

Jeżeli urządzeniem obciążającym badany silnik jest maszyna dynamometryczna, należy wykonać próbę korekcji momentu. Podczas pracy silnika zasilanego napięciem znamionowym o znamionowej częstotliwości, sprzęgniętego z niezasilanym dynamometrem, należy zmierzyć i zanotować: moc wejściową  $P_{d,0}$ , prąd przewodowy  $I_{d,0}$ , prędkość obrotową  $n$ , moment  $T_{d,0}$ , rezystancję  $R_{d,0}$  lub temperaturę  $\theta$ . Należy wyznaczyć poślizg  $s$  oraz straty w uzwojeniu silnika sprzęgniętego z dynamometrem  $P_d$ :

$$P_d = (I^2 R)_{d,0} = 1,5 * I_{d,0}^2 * R_{d,0} \quad (4)$$

Następnie należy uruchomić rozprężony od dynamometru, zasilony napięciem znamionowym o częstotliwości znamionowej silnik, zmierzyć i zanotować moc  $P_0$ , prąd przewodowy  $I_0$  i rezystancję  $R_0$  lub temperaturę  $\theta$ .

Wyznaczyć straty w uzwojeniu silnika rozprężonego:

$$P_s = (I^2 R)_0 = 1,5 * I_0^2 * R_0 \quad (5)$$

Na podstawie tych pomiarów można obliczyć poprawkę momentu dynamometru:

$$T_c = \frac{(P_{d,0} - P_d - P_{fe})(1-s) - (P_0 - P_s - P_{fe})}{2\pi n} - T_{d,0} \quad (6)$$

w którym:  $P_{fe}$  – straty w rdzeniu przy napięciu znamionowym,  $n$  – prędkość obrotowa.

Otrzymaną wartość poprawki należy uwzględnić przy wyznaczaniu mocy na wale  $P_2$  przy obliczaniu strat resztkowych do wyznaczenia strat dodatkowych obciążeniowych.

W stosowanej dotychczas normie PN-EN 60034-2 [4], w zalecanej metodzie strat poszczególnych do wyznaczania strat i sprawności silników indukcyjnych, straty dodatkowe nie były wyznaczane podczas pomiarów. Przyjmowano, że całkowita wartość strat dodatkowych obciążeniowych przy pełnym obciążeniu była równa 0,5% mocy pobranej przy obciążeniu znamionowym; to powodowało, że wartość wyznaczonej sprawności była wyższa niż wartość rzeczywista. W szczególnych przypadkach można było wyznaczyć wartość strat dodatkowych obciążeniowych metodą bezpośredniego pomiaru sprawności, ale niewymagana była korekcja wskazań momentu.

### 2.3. Wyznaczanie wartości sprawności

Na podstawie pomiarów wyznaczane są straty całkowite jako suma strat poszczególnych wyrażona wzorem:

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL} \quad (7)$$

w którym:  $P_k$  to są straty stałe,  $P_s$  – straty w uzwojeniu stojana,  $P_r$  – straty w uzwojeniu wirnika oraz  $P_{LL}$  – straty dodatkowe obciążeniowe.

Straty stałe  $P_k$  wyznaczane są na podstawie pomiarów podczas próby biegu jałowego. Zaliczane są do nich straty w rdzeniu, straty tarcia i straty wentylacyjne.

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe} \quad (8)$$

gdzie:  $P_{fw}$  to straty tarcia i wentylacyjne, a  $P_{fe}$  – straty w rdzeniu.

Ekstrapolując krzywą strat stałych w funkcji kwadratu napięcia linią prostą do napięcia równego zero, czyli do punktu przecięcia ekstrapolowanej linii prostej z osią rzędnych, wyznacza się straty wentylacyjne i straty tarcia  $P_{fw}$ .

Przyjmuje się, że straty te są niezależne od obciążenia, więc taka sama wartość może być użyta w każdym punkcie obciążenia.

Znając wartość strat mechanicznych  $P_{fw}$ , dla napięć między 60% a 125% napięcia znamionowego, należy wykreślić krzywą strat w rdzeniu  $P_{fe} = f(U_0)$

$$P_{fe} = P_k - P_{fw} \quad (9)$$

Straty w rdzeniu w każdym punkcie obciążenia wyznaczone są dla napięcia  $U_r$ , obliczanego ze wzoru (10), uwzględniającego spadek napięcia na uzwojeniu pierwotnym:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \sin \varphi\right)^2} \quad (10)$$

gdzie

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (11)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (12)$$

$U$ ,  $P_1$ ,  $I$  i  $R$  są wartościami zmierzonymi i zapisanymi podczas próby obciążenia.

Metoda wyznaczania strat poszczególnych i ich sumowania przedstawiona w stosowanej dotychczas normie PN-EN 60034-2 [4] nie wymagała uwzględniania wpływu spadku napięcia na rezystancji uzwojenia pierwotnego przy wyznaczaniu strat w rdzeniu w każdym punkcie obciążenia.

Straty dodatkowe obciążeniowe wyznaczone są jako funkcja wyrażona wzorem:

$$P_{LL} = A \cdot T^2 \quad (13)$$

w którym:  $A$  – stała nachylenia obliczona według wzoru (17),  $T$  – moment odczytany w każdym punkcie przy wyznaczaniu charakterystyki obciążenia.

Procedura obliczenia strat dodatkowych obciążeniowych polega na wyznaczeniu strat resztkowych  $P_{Lr}$ , przeprowadzeniu regresji liniowej i obliczeniu stałych  $A$  i  $B$  funkcji  $P_{Lr}$  (16).

Na podstawie wyników pomiarów zanotowanych przy wyznaczaniu charakterystyki obciążenia: napięcie  $U$ , prąd  $I$ , moc  $P_1$ , rezystancja  $R$ , prędkość obrotowa  $n$ , częstotliwość  $f$ , moment  $T$ , w każdym punkcie obciążenia wyznaczone są straty resztkowe wyrażone wzorem:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe,r} - P_{fw} \quad (14)$$

w którym:  $P_1$  – moc pobrana,  $P_s$  – straty w uzwojeniu stojana,  $P_r$  – straty w uzwojeniu wirnika,  $P_{fe,r}$  – straty w rdzeniu przy napięciu zredukowanym  $U_r$ ,  $P_{fw}$  – straty wentylacyjne i tarcia. Moc wydawana  $P_2$  obliczana jest w każdym z sześciu punktów obciążenia ze wzoru:

$$P_2 = 2\pi \cdot T \cdot n \quad (15)$$

w którym:  $T$  to skorygowany moment w każdym z sześciu punktów charakterystyki obciążenia,  $n$  – prędkość obrotowa.

Obliczone dla każdego punktu pomiarowego straty resztkowe, wyrażone jako funkcja kwadratu momentu:

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B \quad (16)$$

poddaje się regresji liniowej i wyznacza się stałe  $A$ ,  $B$  oraz współczynnik korelacji  $\gamma$ .

Współczynniki  $A$  (nachylenie),  $B$  (przecięcie) oraz  $\gamma$  (współczynnik korekcji) obliczane są według wzorów:

$$A = \frac{i \cdot \sum((P_L) \cdot (T^2)) - \sum P_L \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2}, \quad (17)$$

$$B = \frac{\sum P_L}{i} - A \cdot \frac{\sum T^2}{i} \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{i \cdot \sum (P_L \cdot T^2) - (\sum P_L) \cdot (\sum T^2)}{\sqrt{(i \cdot \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \cdot (i \cdot \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2)}} \quad (19)$$

gdzie  $i$  to liczba sumowanych punktów obciążenia.

Jeżeli współczynnik  $\gamma < 0,95$ , należy usunąć niewłaściwy punkt pomiarowy i powtórzyć regresję. Jeżeli nadal  $\gamma < 0,95$ , należy przeprowadzić analizę przyczyn błędów pomiarów, wyeliminować je i powtórzyć ponownie próbę obciążenia.

Wartości strat dodatkowych obciążeniowych  $P_{LL}$  obliczane są według wzoru:

$$P_{LL} = A \cdot T^2 \quad (20)$$

w którym:  $A$  – stała nachylenia obliczona według wzoru (17),  $T$  – moment odczytany w każdym punkcie przy wyznaczaniu charakterystyki obciążenia.



Obliczone na podstawie pomiarów wartości strat w uzwojeniu stojana, strat w uzwojeniu wirnika oraz mocy wydawanej są korygowane do temperatury odniesienia czynnika chłodzącego 25°C.

Współczynnik korekcyjny rezystancji uzwojenia stojana oraz poślizgu obliczany jest według wzoru

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (21)$$

w którym  $\theta_w$  to temperatura uzwojenia podczas próby obciążenia,  $\theta_c$  – temperatura czynnika chłodzącego na wlocie podczas próby.

Według normy PN-EN 60034-2 [4] wszystkie straty w uzwojeniach były sprowadzane do temperatury odniesienia odpowiedniej dla klasy ciepłoodporności izolacji.

Sprawność obliczana jest wg wzoru (3) po wyznaczeniu wszystkich strat oraz obliczeniu ich sumy według wzoru (7).

Straty i sprawność znamionowa wyznaczone są z wartości zanotowanych na końcu próby nagrzewania przy obciążeniu znamionowym: moc  $P_N$ , prąd  $I_N$ , napięcie  $U_N$ , poślizg  $s$ , temperatura czynnika chłodzącego  $\theta_c$ ,  $R_N = R$  (rezystancja mierzona w czasie próby obciążenia),  $\theta_N$  temperatura uzwojenia.

### 3. ZAKOŃCZENIE

---

Silniki energooszczędne różnią się pod wieloma względami od silników standardowych ogólnego przeznaczenia. Wprowadzone w normie PN-EN 60034-2-1 [5] zmiany dotyczące metod wyznaczania strat i sprawności uwzględniły specyfikę silników energooszczędnych. Europejscy dostawcy silników energooszczędnych dostosowali się do nowych przepisów i oferują już silniki o klasie sprawności IE2, a także IE3, oznakowane zgodnie z wymaganiami normy IEC 60034-30 [2] (odpowiada jej polska norma PN-EN 60034-30 [6]), których sprawność jest wyznaczana metodami zawartymi w normie IEC 60034-2-1 [5] (odpowiada jej polska norma PN-EN 60034-2-1 [5]).

Wprowadzone zmiany w wyznaczaniu sprawności mają na celu zbliżenie wartości wyznaczonej na podstawie badań do wartości rzeczywistej tego bardzo istotnego dla celów komercyjnych parametru. Uwzględniana jest korekcja odczytów momentu dynamometru. Przy wyznaczaniu strat w rdzeniu uwzględniany jest spadek napięcia na rezystancji uzwojenia pierwotnego. Straty dodatkowe obciążeniowe wyznaczone są na podstawie pomiarów. Straty w uz-

wojeniu stojana, straty w uzwojeniu wirnika oraz moc na wyjściu silnika korygowane są do temperatury odniesienia czynnika chłodzącego.

## LITERATURA

1. IEC 34-2-1. Edition 1.0 2007-09. International Standard. Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from test (excluding machines for traction vehicles).
2. IEC 60034-30. Edition 1.0 2008-10. International Standard. Rotating electrical machines. Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code).
3. PN-EN 60034-1:2011 Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry (*org*).
4. PN-EN 60034-2:2000 Maszyny elektryczne wirujące. Część 2: Metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań (z wyjątkiem maszyn pojazdów trakcyjnych).
5. PN-EN 60034-2-1:2010 Maszyny elektryczne wirujące. Część 2-1: Znormalizowane metody wyznaczania strat i sprawności na podstawie badań (z wyjątkiem maszyn pojazdów trakcyjnych).
6. PN-EN 60034-30:2009 Maszyny elektryczne wirujące. Część 30: Klasy sprawności silników indukcyjnych klatkowych jednobiegowych (kod IE) (*org*).

*Rękopis dostarczono dnia 02.03.2012 r.*

### THE LOSSES AND EFFICIENCY DETERMINATION FOR THREE-PHASE, SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS – NEW REQUIREMENTS OF STANDARDS

Elżbieta OGONOWSKA-SCHWEITZER

**ABSTRACT** *The paper presents losses and efficiency determination method in squirrel-cage induction motors according to the Polish Standard PN-EN 60034-2-1:2008. The requirements of measuring instruments accuracy, testing procedure and method of losses and efficiency determination were presented. Take notice to new elements in procedure of calculation losses and efficiency which have influence on accuracy of efficiency determination.*

**Keywords:** *losses, efficiency, motors, induction, requirements, standards*