

Wpływ odchyień napięcia sieci energetycznej na sprawność silników indukcyjnych

Tomasz Kołacz^a, Marcin Piekieniak^a, Jerzy Skwarczyński^{a,*}

^aPaństwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Tarnowie, Instytut Politechniczny, ul. Adama Mickiewicza 8, 33-100, Tarnów, Polska

*Corresponding author: j_skw@pwszta.edu.pl

Streszczenie

Celem pracy było wykonanie pomiarów laboratoryjnych dla określenia wpływu wartości napięcia zasilającego na sprawność silnika indukcyjnego. Obiektem badanym był silnik indukcyjny pierścieniowy małej mocy w warunkach stałego obciążenia. Wyniki zostały przedstawione w formie wykresów.

Słowa kluczowe: sprawność silnika indukcyjnego, odchylenia napięcia, straty poszczególne

Abstract

The objective of the research was to perform laboratory measurements to determine the impact of supply voltage to the efficiency of the induction motor. The object of the tests was the low power slip-ring induction motor working under the constant load conditions. The results have been presented in the form of graphs.

Key words: efficiency of an induction motor, supply voltage variations, specified losses

Wstęp

Wśród wskaźników jakości energii elektrycznej wymienia się odchylenia wartości skutecznej napięcia od poziomu znamionowego. Zmiany wartości napięcia zasilającego urządzenia elektryczne powodują szereg ujemnych skutków o charakterze techniczno-technologicznym i ergonomicznym. W sferze produkcyjnej jedne i drugie wywołują dodatkowe koszty [1]. Spośród urządzeń szczególnie wrażliwych na skutki wahań napięcia wymienia się silniki indukcyjne, w których produkowany moment zależy od kwadratu napięcia zasilającego. Ponieważ silników tych ilościowo

jest najwięcej podejrzewa się, że koszty spowodowane zmniejszeniem sprawności silników na skutek niewłaściwego poziomu napięcia zasilającego mogą być znaczące. W literaturze trudno jednak odnaleźć wyczerpujące informacje o zależności sprawności maszyn indukcyjnych od wartości napięcia zasilającego, a także o wpływie stopnia obciążenia silnika na tę zależność. Próba udzielenia odpowiedzi na te pytania była tematem podjętych prac dyplomowych [6], przy czym pierwszym etapem było wykonanie odpowiednich pomiarów laboratoryjnych. Obiektem badanym był silnik indukcyjny pierścieniowy małej mocy.

Wybór metody pomiarowej

Zgodnie z zaleceniami norm, sprawność silników indukcyjnych małej mocy powinna być wyznaczana, ewentualnie sprawdzana, metodą bezpośredniego obciążenia. W tabeli 1 przedstawiono wyniki dwóch pomiarów silnika 1,3kW, obciążonego w przybliżeniu znamionowo maszyną komutatorową prądu stałego podwójnie łożyskowaną. Moment reakcji stojana maszyny obciążającej mierzony był za pomocą wagi elektronicznej (pomiar 1) oraz wagi mechanicznej (pomiar 2). Straty w rdzeniu stojana zostały wyznaczone oddzielnym pomiarem wykonanym w warunkach biegu jałowego.

W obu przypadkach stwierdzono trudności w bilansowaniu ok. 7% mocy czynnej. Nie można wykluczyć, że wartość tą zmniejszyło by użycie dokładniejszych metod pomiarowych, np. wykorzystanie momentomierza o małej niepewności pomiaru, dokładniejsza kontrola rezystancji uzwojeń w trakcie wykonywania badań, a także bardziej szczegółowa analiza reprezentatywnej rezystancji przejścia szczotki-pierścienie. Wiadomo jednak, że w większości maszyn występują w różnym stopniu zjawiska nie uwzględniane podczas projektowania, powodujące wydzielanie się ciepła w elementach konstrukcyjnych maszyny. Straty z tym związane obejmuje się ogólnie nazwą dodatkowych. Ich uzależnienie od napię-

Tabela 1. Pomiary strat i sprawności metodą bezpośredniego obciążenia

| | Dane producenta (wartości znamionowe) | Pomiar 1 (wartości względne) | Pomiar 2 (wartości względne) |
|---|--|---------------------------------|---------------------------------|
| napięcie U_s | $U_{sn} = 400V$ | 0,998 | 1,003 |
| prąd stojana I_s | $I_{sn} = 3,3A$ | 0,993 | 0,95 |
| poślizg s | $s_n = 0,127$ | 0,141 | 0,132 |
| moc pobierana P_{pob} | 1874,8W (1,44 P_n) | 1,463 | 1,409 |
| cosφ | $\cos\varphi_n = 0,82$ | 0,84 | 0,844 |
| prąd wirnika I_w | $I_{wn} = 23,2A$ | 1,267 | 1,2 |
| moment T_{ucyf} | $T_n = 9,48Nm$ | 1,05 | 1,03 |
| moc wydawana P_{wyd} | $P_n = 1300W$ | 1,033 | 1,023 |
| Sprawność η | $\eta_n = 0,693$ | 0,706 | 0,726 |
| straty w uzwojeniach stojana P_{dCus} | 176,4W (0,136 P_n) | 0,134 | 0,122 |
| straty w rdzeniu stojana P_{dFes} | | 0,036 | 0,025 |
| straty w uzwojeniach wirnika P_{dCuw} | 75W | 0,177 | 0,159 |
| straty w rdzeniu wirnika P_{dFew} | | 0,0015 | 0,001 |
| straty podstawowe (Cu+Fe) P_{dpodst} | | 0,349 | 0,306 |
| straty całkowite $P_{dc} = P_{pob} - P_{wyd}$ | 574,8W (0,44 P_n) | 0,43 | 0,386 |
| straty dodatkowe $P_{ddod} = P_{dc} - P_{dpodst}$ | | 0,081 | 0,0795 |
| straty mechaniczne $P_{dmech} < 0,01P_n$ | | ok. 0,009 | ok. 0,009 |
| straty nieokreślonych źródeł P_{dmok} | | ok. 0,07 | ok. 0,07 |

cia, prądów oraz prędkości obrotowej bywa zwykle trudne, a ich przyczyny często są różne. Celem podjętych badań było przede wszystkim ustalenie zależności od napięcia tej dominującej części strat, które występują w każdej maszynie. Dlatego zrezygnowano z pomiaru strat i sprawności metodą bezpośredniego obciążenia, wybierając metodę strat poszczególnych.

Moment elektromagnetyczny wytwarzany w silniku indukcyjnym zależy od kwadratu napięć zasilających. Obniżenie wartości skutecznej napięcia zasilającego silnik obciążony powoduje zwiększenie poślizgu, wzrost prądów oraz wzrost strat w uzwojeniach. Równocześnie jednak zmniejszają się straty w rdzeniu stojana, przy czym ich zależność od napięcia zasilającego jest w przybliżeniu kwadratowa. Wzrost napięcia powoduje efekt odwrotny, ale równocześnie wzrasta nasycenie rdzenia. W sumie, w zależności od relacji pomiędzy stratami w uzwojeniach i rdzeniu, od obciążenia maszyny oraz położenia na krzywej magnesowania indukcji w znamionowym punkcie pracy, wpływ napięcia na zmiany strat mogą być różne, ale także niewielkie. Dlatego dla ich oceny wybrano przejrzystą metodę strat poszczególnych, ograniczając się do rozpatrywania strat podstawowych, tj. w uzwojeniach i rdzeniu, których uwarunkowania w różnych maszynach są jednakowe.

Zgodnie z takim podejściem mierzone były jedynie dostępne pomiarowo wielkości elektryczne, tzn. napięcia na uzwojeniach stojana oraz prądy uzwojeń wirnika i stojana. Moc odpowiadająca wytwarzanemu momentowi elektromagnetycznemu T_e była obliczana przez odjęcie mocy strat podstawowych od mocy pobieranej z sieci:

$$\omega_m T_e = P_e = P_{pob} - P_{dpodst} \quad (1)$$

$$P_{dpodst} = P_{dCus} + P_{dFes} + P_{dCuw} + P_{dFew} \quad (2)$$

gdzie:

P_{dpodst} – straty podstawowe,

P_{dCus}, P_{dFes} – straty w uzwojeniach i rdzeniu stojana,

P_{dCuw}, P_{dFew} – straty w uzwojeniach i rdzeniu wirnika,

ω_m – prędkość kątowna wirnika,

P_{pob} – moc pobierana.

Jako moc użyteczną (P_{wyd}) traktowano moc P_e pomniejszoną o straty mechaniczne P_{dmech} :

$$P_{wyd} = P_e - P_{dmech} \quad (3)$$

Moment użyteczny (napędowy, „na wale”) odpowiada mocy wydawanej:

$$P_{wyd} = \omega_m T_{uzyt} \quad (4)$$

Ewentualne straty dodatkowe P_{ddod} wydzielane w elementach konstrukcyjnych pomniejszą strumień mocy P_e przetwarzanej na mechaniczną, co powinno być uwzględnione przez odpowiednie uzupełnienie wzoru (1). W ramach tego etapu pracy nie było to jednak robione, więc straty całkowite jako różnica mocy pobieranej i wydawanej obejmują jedynie straty podstawowe i mechaniczne:

$$P_{dc} = P_{pob} - P_{wyd} = P_{dpodst} + P_{dmech} \quad (5)$$

Sprawność jest ilorazem mocy wydawanej i pobieranej:

$$\eta = \frac{P_{wyd}}{P_{pob}} \quad (6)$$

Wpływ napięcia na straty i sprawność powinno się rozpatrywać w warunkach obciążenia silnika stałym momentem, lub stałą mocą, ponieważ oba rodzaje pracy mają miejsce w praktyce.

Realizacja pomiarów

Pomiar wielkości elektrycznych był dokonywany metodami cyfrowymi z zastosowaniem separatorów LEM i przetworników A/C. Częstotliwość próbkowania wynosiła 5kHz. Moc czynną pobieraną przez silnik obliczano jako wartością średnią mocy chwilowej pobieranej przez poszczególne fazy:

$$P_{pob} = \frac{1}{T_s} \sum_{k=1}^3 \int_0^{T_s} u_k(t) i_k(t) dt \quad (7)$$

Operację całkowania zastępowano sumowaniem iloczynów próbek napięcia i prądu. Moc czynna wydzielana na rezystancjach uzwojeń stojana i obwodów wirnika obliczana była z tego samego wzoru, z uwzględnieniem związku $u_k(t) = R_k i_k(t)$. Pomiaru wykonywano na maszynie nagrzananej, kontrolując dodatkowo wartość rezystancji przed i po każdym pomiarze.

Wartość zastępczą rezystancji wirnika przyjęto na podstawie pomiaru metodą techniczną rezystancji obwodu utworzonego z dwóch uzwojeń wirnika oraz pary zestyków pierścieni-szczotka zasilonych prądem stałym o wartości ok. $0,6 I_{wn}$, przy obracającym się wirniku.

Straty w rdzeniu stojana, określone w warunkach stanu jałowego w sposób ogólnie stosowany [2], uzależniono od kwadratu wewnętrznej sem E_s . Była ona obliczana dla każdego punktu pomiarowego, zgodnie ze schematem zastępczym ze wzoru:

$$E_s = U_f \left| \frac{Z_s}{Z_s} \right|; \quad Z_s = R_s + jX_{os} + \frac{jX_{\mu} Z_r}{jX_{\mu} + Z_r}; \quad Z_r = \frac{R'_w}{s} + jX'_{\sigma w} \quad (8)$$

w którym:

U_{sf} – napięcie zasilające silnika, fazowe, wartość skuteczna,

s – poślizg,

$R_s, R'_w, X_{os}, X'_{\sigma w}, X_{\mu}$ – parametry schematu za-

stępczego silnika.

Straty w rdzeniu wirnika szacowano wg [3] zakładając, że powierzchnia przekroju poprzecznego jarzma wirnika do powierzchni jarzma stojana wynosi 2/3:

$$P_{dFew} \approx P_{dFes} \frac{2}{3} \left(\frac{f_w}{f_s} \right)^{4/3} = \frac{2}{3} P_{dFes} s^{4/3} \quad (9)$$

Straty mechaniczne są funkcją, między innymi prędkości obrotowej. Ponieważ zmiany tej prędkości przy zmianach obciążenia i napięcia nie były wielkie, na podstawie pomiaru w stanie biegu jałowego przyjęto straty mechaniczne zespołu

$$P_{dmech} \approx const \approx 0,009 P_n.$$

Przy wyznaczaniu poślizgu silnika wspomagało się szybką transformatą Fouriera (FFT) określając częstotliwość podstawowej harmonicznej zarejestrowanych prądów wirnika.

W celach kontrolnych obliczano wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez pierwszą harmoniczną pola szczelinowego oraz podstawową harmoniczną prądu wirnika wg wzoru:

$$T_{e1} = \frac{3}{2} \frac{P_b}{2\pi f_s} I_w^2 \frac{R_w}{s} \quad (10)$$

Wyznaczone w ten sposób wartości różniły się od policzonych wg (1) – wartość momentu wg (10) była ok. 5% mniejsza.

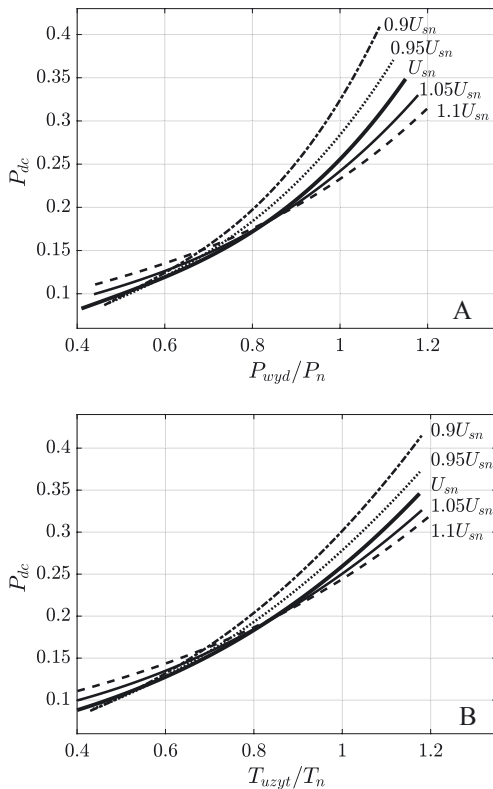
Wyniki pomiarów i obliczeń

W trakcie opracowania zarejestrowanych przebiegów wykorzystywano parametry schematu zastępczego silnika oraz inne niezbędne do obliczeń wielkości wyznaczone w oparciu o klasyczne pomiary identyfikacyjne [2]:

$$R_s = 5,4\Omega, X_{os} = 7,1\Omega, X_{\mu} = 137,8\Omega, X'_{\sigma w} = 7,2\Omega,$$

$$R'_w = 0,089 n^2[\Omega], n = 10,58, P_{dFeso} = 0,036 P_n$$

Zachowanie warunku stałej mocy wydawanej i stałego momentu obciążenia przy zmianach napięcia zasilającego bywa w warunkach laboratoryjnych kłopotliwe, dlatego docelowe charakterystyki starano się uzyskać w dwóch etapach. Najpierw wyznaczono zależność strat podstawowych mocy wydawanej oraz momentu obciążenia, dla kilku wartości napięć zasilających. Ograniczono się do pięciu: 0,9, 0,95, 1, 1,05, 1,1 U_n . Poszczególne charakterystyki przybliżano wielomianami trzeciego stopnia [4]. Na rysunku 1 przedstawiono wykresy strat całkowitych jako funkcji mocy wydawanej (Rys. 1A) oraz momentu (Rys. 1B).

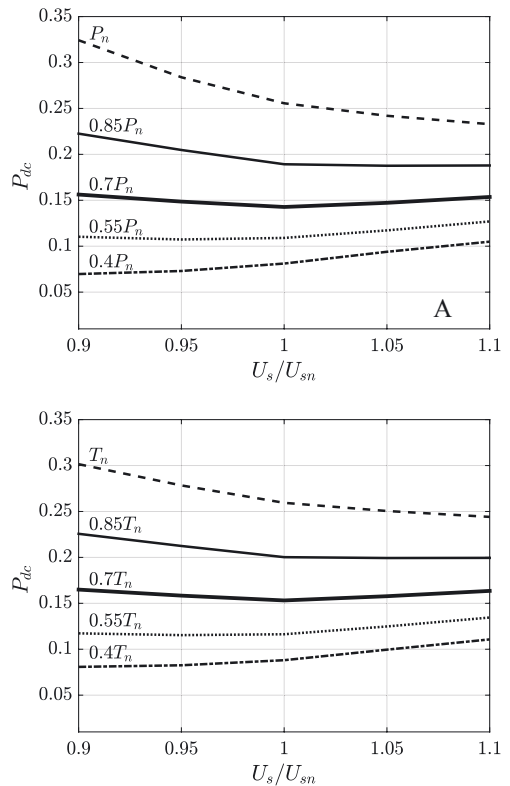


Rysunek 1. Zależność strat całkowitych od mocy wydawanej (A) i momentu użytecznego (B) przy stałym napięciu

Zgodnie z przewidywaniem, wraz ze zwiększaniem obciążenia straty monotonicznie rosną, przy czym dla mniejszych obciążeń udział strat

w rdzeniu relatywnie wzrasta, dlatego straty całkowite wzrastają ze wzrostem napięcia. Przy obciążeniach dużych sytuacja jest odwrotna, ponieważ dominują straty w uzwojeniach, które ze wzrostem napięcia zasilającego maleją.

Dysponując analityczną formą zależności P_{dc} (P_{wyd}) oraz P_{dc} (T_{uzyt}) dla $U_s = const$, można już było w prosty sposób uzyskać kilka punktów przebiegu $P_{dc}(U_s)$ oraz $\eta(U_s)$. Na rysunku 2 przedstawiono wykresy strat całkowitych jako funkcji napięcia zasilającego dla stałej mocy wydawanej (Rys. 2A) oraz momentu obciążenia (Rys. 2B).

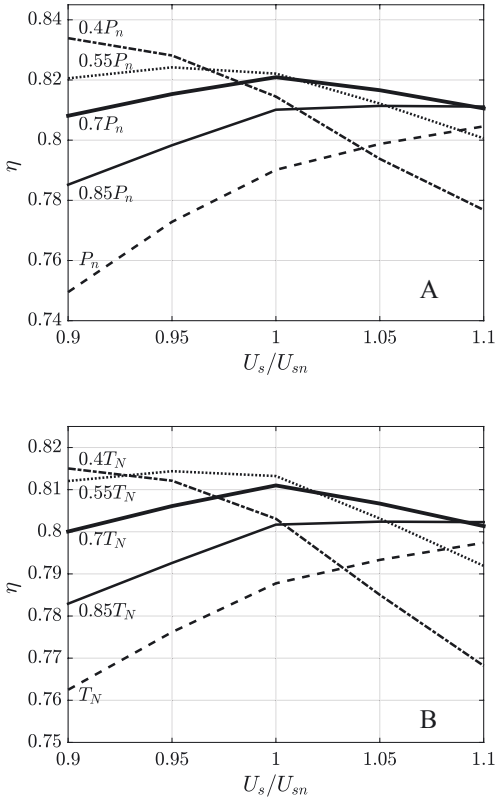


Rysunek 2. Zależność strat całkowitych od napięcia przy stałej mocy wydawanej (A) oraz przy stałym momencie obciążenia (B)

Na wykresach widać wyraźnie jak odmiennie wpływa poziom napięcia zasilającego na wartość strat całkowitych przy obciążeniach dużych i ma-

łych: przy dużych obciążeniach straty monotonicznie maleją ze wzrostem napięcia, przy małych – rosną. Minimum strat odpowiada napięciu znamionowemu dla 70% obciążenia znamionowego.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy sprawności jako funkcji napięcia zasilającego dla stałej mocy wydawanej (Rys.3A) oraz momentu obciążenia (Rys.3B).



Rysunek 3. Zależność sprawności od napięcia przy stałej mocy wydawanej (A) oraz przy stałym momencie obciążenia (B)

Na wykresach z rysunku 3 wpływ obciążenia silnika na zmiany sprawności uwidacznia się lepiej niż na wykresach wcześniejszych: sprawność silnika obciążonego znamionowo rośnie ze wzrostem napięcia, podczas gdy obciążonego w 40%

spada. Natomiast silnik obciążony w 70% zmienia swoją sprawność w granicach błędów pomiarowych, przy czym słabo wyekspozowane maksimum sprawności występuje tutaj przy napięciu znamionowym.

Wnioski

Z wykonanych pomiarów laboratoryjnych oraz obliczeń wynika, że dla badanego silnika obciążonego, pozostającego w trybie pracy ciągłej (S1), nie można jednoznacznie przewidywać, że odchylenia wartości skutecznej napięcia od wartości znamionowej spowodują obniżenie sprawności i wzrost kosztów eksploatacji, ponieważ zmiany strat i sprawności zależą w sposób istotny od stopnia i rodzaju obciążenia, i to zarówno co do wielkości jak i znaku. W dopuszczonym przepisami [5] przedziale zmian wartości napięcia od -10% do $+10\%$ silnik obciążony znamionowo zwiększy swoją sprawność o ponad 5% przy pracy „na stałą moc” oraz o 3,5% przy pracy „na stały moment”. O badanym silniku obciążonym w 70% można powiedzieć, że w tym zakresie jest praktycznie „niewrażliwy” na zmiany napięcia. Natomiast w silniku obciążonym poniżej 50%, wzrost napięcia powoduje obniżenie sprawności: 5% przy pracy „na stałą moc” oraz o 4,5% przy pracy „na stały moment”.

Choć badaną maszynę można zaliczyć do typowych maszyn indukcyjnych pierścieniowych małej mocy, nie można przedstawionych wniosków uogólniać na większość silników indukcyjnych. Tym niemniej wykonane badania rzucają pewne światło na skalę i charakter zjawisk spowodowanych odchyleniami napięcia. Można jednak przewidywać, że w innych rodzajach pracy, np. przy pracy przerywanej z częstymi rozruchami, zmiany napięcia mogą zupełnie inaczej wpływać na koszty eksploatacji napędu.

Literatura

1. Z. Hanzelka, Wahania napięcia, e-pismo Automatyka-Elektryka-Zakłócenia nr 5, <http://www.cire.pl/pliki/2/Hanzelka-nr5.pdf>
2. W. Latek, Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle, WNT 1989.
3. M. Dąbrowski, Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT 1994.
4. MATLAB R2013b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
5. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623 z późn. zmianami).
6. M. Piekieniak, Sprawność silnika indukcyjnego w warunkach wahań napięcia zasilania – pomiary laboratoryjne, Praca dyplomowa inżynierska, PWSZ w Tarnowie 2017.

