

Jakub Bernatt, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ENERGOOSZCZĘDNY UKŁAD NAPĘDOWY

ENERGY-SAVING DRIVE SYSTEM

Streszczenie: Moment znamionowy maszyny elektrycznej determinuje jej gabaryt. Maszyny wolnoobrotowe mają większą objętość i masę od maszyn o tej samej mocy znamionowej lecz wyższej znamionowej prędkości obrotowej. Sprawność energetyczna maszyny obciążonej mocą znacznie mniejszą od mocy znamionowej ma także sprawności mniejszą od znamionowej. Porównano sprawność energetyczną trzech układów napędowych napędzających maszynę roboczą z prędkością obrotową $n = 187,5$ obr/min i wykazano, że sprawność silnika synchronicznego o liczbie par biegunów $p = 16$, w warunkach pracy, wynosi $\eta = 77\%$ i jest mniejsza o 16% od sprawności silnika synchronicznego i silnika indukcyjnego, o liczbie par biegunów $p = 2$, plus przekładnie mechaniczne o przełożeniu $i = 8$. Silniki synchroniczny i indukcyjny, o liczbie par biegunów $p = 2$, plus przekładnie mechaniczne o przełożeniu $i = 8$ stanowią napęd alternatywny do silnika synchronicznego wolnoobrotowego o liczbie par biegunów $p = 16$.

Abstract: The rated torque of the electric machine determines its dimensions. Slow-running machines have a larger volume and weight than machines with the same rated power but higher rated rotational speed. The energy efficiency of the machine loaded with power significantly lower than the rated power also has the efficiency lower than the rated one. The energy efficiency of three drive systems driving a working machine with a rotational speed of $n = 187.5$ rpm was compared and it was shown that the efficiency of a synchronous motor with the number of $p = 16$ poles under operating conditions is $\eta = 77\%$ and is 16% lower than that of a synchronous motor and an induction motor with the number of pole pairs $p = 2$, plus mechanical gears with the ratio $i = 8$. Synchronous and induction motors with the number of pole pairs $p = 2$ plus mechanical gears with the ratio $i = 8$ constitute an alternative drive to the slow-speed synchronous motor with the number of pole pairs $p = 16$.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, silnik indukcyjny, układ napędowy wolnoobrotowy, gabaryt, sprawność
Keywords: synchronous motor, induction motor, low-speed drive system, dimensions, efficiency

1. Wstęp

Oszczędność energii w układach napędowych jest ważnym problemem. Komisja Europejska wydała Rozporządzenie 2019/1781 dotyczące minimalnych sprawności silników elektrycznych oraz przemienników częstotliwości wprowadzanych na rynek UE [7]. Rozporządzenie dotyczy zakresu mocy 0,12 kW do 1000 kW. Potocznie silniki te nazywamy energooszczędnymi [1, 2]. Wiadomo jednak, że największe oszczędności energii układu napędowego z silnikami indukcyjnymi bądź synchronicznymi uzyskuje się gdy silnik pracuje przy minimalnej, dopuszczalnej przez technologię produkcji, prędkości obrotowej, przy czym regulacja prędkości odbywa się poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego silnik [6]. Jednak w tym artykule omówimy problem energooszczędności układu napędowego napędzającego maszynę roboczą pracującą przy stałej prędkości obrotowej lecz przy stosunkowo małej prędkości obrotowej, np. mniejszej od 200 obr/min. Porównamy spraw-

ność energetyczną silników zasilanych bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej o parametrach: 6 kV, 50 Hz, w dwóch wariantach rozwiązania układu napędowego maszyny roboczej:

- silnika synchronicznego o prędkości obrotowej dopasowanej, poprzez dobranie liczby par biegunów uzwojenia twornika $p = 16$, do prędkości obrotowej $n = 187,5$ obr/min, maszyny roboczej i
- silników synchronicznego i indukcyjnego o liczbie par biegunów $p = 2$ sprzęgniętego z maszyną roboczą poprzez przekładnie mechaniczną o przełożeniu $i = 8$ redukującą prędkość obrotową do wartości $n = 187,5$ obr/min, wymaganej przez maszynę roboczą.

2. Związek między objętością silnika i jego parametrami znamionowymi

Wymiary silnika determinuje moc pola wirującego w znamionowych warunkach pracy [6]

$$P_{\psi N} = \sqrt{3}E_N I_N \quad (1.1)$$

Przy zaniedbaniu strat mocy w uzwojeniu stojana $\Delta P_{Cu} = 0$ i pakiecie balach (jarzmie) stojana $\Delta P_{Fe} = 0$

$$P_N \approx P_{\psi N} \quad (1.2)$$

$$E_N \approx U_N E_N = C_E \Phi \omega_N \quad (1.3)$$

Dla silnika synchronicznego

$$\omega_N = \pi \frac{n_N}{30} = \frac{\omega_1}{p}$$

Dla silnika indukcyjnego

$$\omega_N = \pi \frac{n_N}{30} = (1 - s_N) \frac{\omega_1}{p} \approx \frac{\omega_1}{p}$$

Poszczególne symbole oznaczają:

$P_{\psi N}$ – moc pola wirującego,

P_N – moc znamionowa,

Φ – strumień magnetyczny w szczelinie magnetycznej,

U_N – napięcie znamionowe,

I_N – prąd znamionowy,

n_N – znamionowa prędkość obrotowa,

$\omega_1 = 314$ 1/s – pulsacja napięcia sieci zasilającej,

p – liczba par biegunów,

C_E – stała proporcjonalna do liczby zwojów N i współczynnika uzwojenia k_u .

Na podstawie zależności (1.1) - (1.3) moc znamionową P_N maszyny elektrycznej można zapisać wyrażeniem

$$P_N = \sqrt{3}C_E \Phi I_N \omega_N \quad (1.4)$$

przy czym

$$\Phi = l_i \int_0^\tau B(x) dx = l_i \tau \xi B = S_{Fe} \xi B \quad (1.5a)$$

$$I_N = S_{Cu} j_N \quad (1.5b)$$

oraz

$$\xi = \frac{B_{sr}}{B} \quad (1.6a)$$

$$B_{sr} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau B(x) dx \quad (1.6b)$$

Moc znamionowa

$$P_N = \sqrt{3}C_E \xi B j_N (S_{Fe} S_{Cu}) \omega_N \quad (1.7)$$

przy czym:

B – indukcja maksymalna w szczelinie,

l_i, τ – długość jarzma twornika i podziałka biegunowa,

ξ – stosunek indukcji średniej do indukcji maksymalnej,

j_N – gęstość znamionowa prądu,

S_{Cu} – przekrój przewodów,

S_{Fe} – przekrój jarzma.

Jeśli porównywać gabaryty maszyn elektrycznych o tej samej klasie izolacji, o tym samym systemie chłodzenia i o obwodzie magnetycznym zbudowanym z tych samych blach ferromagnetycznych, to można powiedzieć, że zarówno indukcja B , jak i gęstość prądu j_N w tych maszynach są identyczne, gdyż indukcja B determinuje nasycenie obwodu magnetycznego, a gęstość prądu j_N w przekrojach przewodów determinuje temperatura ustalona uzwojenia. Przyjmując zatem, że w maszynach elektrycznych identycznego typu współczynnik

$$\zeta = \sqrt{3}C_E \xi B j_N = \text{const} \quad (1.8)$$

Przekrój jarzma S_{Fe} i przekrój miedzi S_{Cu} determinują objętość V maszyny

$$V = (S_{Cu} S_{Fe})^{\frac{3}{4}} \quad (1.9)$$

Stąd związek między mocą znamionową a objętością wyraża się wzorem

$$P_N = \zeta \frac{\pi}{30} n_N V^{4/3} \quad (1.10)$$

Moment znamionowy maszyn elektrycznych

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \zeta (V)^{4/3} \quad (1.11)$$

Wzór (1.10) wskazuje, że moc znamionowa maszyn elektrycznych o tej samej liczbie par biegunów rośnie szybciej niż objętość. Na przykład maszyna elektryczna o dwukrotnie większej objętości będzie mieć moc znamionową w przybliżeniu 2,5 razy większą. Ze wzoru (1.10) wiadać także, że moc znamionowa maszyny elektrycznej, przy tej samej objętości, jest liniową funkcją prędkości znamionowej. Im maszyna ma większą prędkość znamionową, przy tej samej mocy znamionowej, tym jej gabaryt jest mniejszy. W mniejszym gabarycie straty mocy także są mniejsze, gdyż gęstość strat mocy jest w przybliżeniu taka sama, zatem w mniejszej objętości jest mniej strat mocy. Porównując sprawność dwóch maszyn tego samego typu i identycznej mocy znamionowej, przy czym prędkość znamionowa maszyny pierwszej n_N^I jest większa od prędkości znamionowej ma-

szyny drugiej n_N^I , widać, że sprawności η tych maszyn będą różne. Można to zapisać następująco, jeśli

$$P_N^I = P_N^II,$$

lecz $n_N^I > n_N^II$, to $\eta^I > \eta^II$ (1.12)

Cena maszyny zależy od gabarytu. Maszyna elektryczna na mniejszą prędkość znamionową jest droższa, a jej sprawność przetwarzania energii jest mniejsza. Warto o tym pamiętać.

Projektując na przykład prądnice do elektrowni wiatrowej stosuje się przekładnię mechaniczną podwyższającą prędkość obrotową prądnicy w stosunku do prędkości turbiny wiatrowej. Dzieje się tak dlatego, ponieważ turbina wiatrowa pracuje przy małej prędkości obrotowej (około 26 obr/min). Prądnica zaprojektowana na tę prędkość obrotową miałaby duży gabaryt. Straty mocy w prądnicy wydzielają się w żelazie i w uzwojeniach, duża masa żelaza i duża masa uzwojeń oznacza, że straty mocy są duże i sprawność elektrowni wiatrowej jest mniejsza w stosunku do elektrowni z prądnicami o tej samej mocy, lecz wyższej prędkości obrotowej. Gabaryt całego napędu o określonych parametrach (P_N , n_N) złożonego z prądnicy i przekładni mechanicznej jest znacznie mniejszy od gabarytu samej prądnicy zaprojektowanej na identyczne parametry, lecz bez przekładni mechanicznej.

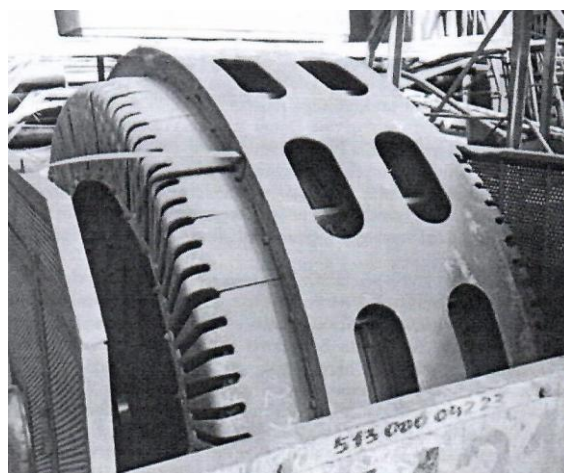
Zależność (1.10) jest uproszczona, nie uwzględnia się chłodzenia maszyny (odprowadzenia ciepła). Projektując serię maszyn o mocy znamionowej na przykład od 0,21 kW do 1000 kW [7] i o różnych prędkościach obrotowych na przykład od 750 obr/min do 3000 obr/min, należy przeprowadzać także obliczenia cieplne. Odprowadzanie ciepła zależy od powierzchni zewnętrznej, która jest proporcjonalna do $(V^{2/3})$ i od warunków chłodzenia. Straty energii rosną wraz z mocą P_N , a stosunek objętości V do mocy P_N , wraz ze wzrostem mocy P_N , zmniejsza się. Powierzchnia chłodzenia zmniejsza się i zmniejsza się możliwość odprowadzenia ciepła do otoczenia. Temperatura ustalona uzwojenia jest determinowana klasą izolacji i jest niezależna od objętości maszyny.

Projektowanie maszyny wymaga zatem złożonych obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych i wentylacyjnych, a czasem także wytrzymałościowych.

3. Sprawność energetyczna silnika niskoobrotowego

Sprawność maszyny elektrycznej niskoobrotowej zilustrujemy na przykładzie silnika synchronicznego o parametrach znamionowych $P_N = 630$ kW, $U_N = 6$ kV, $I_N = 84$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 187,5$ obr/min, $\cos\varphi_N = 0,8$, $T_N = 32,1$ kN·m i liczbie par biegunów $p = \frac{60 \cdot f_N}{n_N} = \frac{60 \cdot 50}{187,5} = 16$. Parametry znamionowe wzbudzenia DC: $U_{fN} = 40$ V, $I_{fN} = 820$ A. Moment znamionowy silnika determinuje jego gabaryt i masę. W gabarycie silnika rozprasa się energia strat zamieniana na ciepło. Jeśli w zakładzie pracuje kilkanaście silników synchronicznych, to każdy z nich generuje do sieci moc bierną indukcyjną (obciąża sieć jak kondensator), to powoduje wzrost napięcia sieci do 6300 V, a czasem i więcej. Wyższe napięcie to i większe straty mocy w silnikach. Silnik napędza maszynę roboczą. Zarejestrowane parametry pracy silnika w stanie ustalonym: $U = 6307$ V, $I = 39,6$ A, $P_1 = 413,1$ kW, $\cos\varphi = 0,955$, $f = 50$ Hz, $n = 187,5$ obr/min, $T = 16,9$ kN·m, $U_f = 28,8$ V, $I_f = 624$ A.

Porównując parametry znamionowe silnika z parametrami pracy widać, że silnik jest przewymiarowany o 50%. Obliczymy sprawność silnika znamionową i sprawność w warunkach pracy.



Rys. 1. Silnik synchroniczny: 630 kW, 6 kV, 187,5 obr/min na stanowisku pracy

W znamionowych warunkach pracy silnik pobiera z sieci elektroenergetycznej moc

$$P_{1N} = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 84 \cdot 0,8 = 698 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu znamionowego

$$P_N = T_N \frac{\pi n_N}{30} = 32,1 \cdot \frac{\pi \cdot 187,5}{30} = 630 \text{ kW}$$

Ta wartość mocy jest podana na tabliczce znamionowej.

Straty mocy w znamionowych warunkach pracy

$$\Delta P_N = P_{1N} - P_{mN} + U_{fN} I_{fN} = 698 - 630 + 40 \cdot 820 \cdot 10^{-3} = 101 \text{ kW}$$

Sprawność znamionowa silnika

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_N} 100 = \frac{630}{630 + 101} 100 = 86\%$$

Im gabaryt maszyny jest większy to straty mocy są większe i sprawność jest mniejsza. Straty mocy i sprawność silnika w warunkach pracy. Moc pobiera z sieci elektroenergetycznej

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6,307 \cdot 39,6 \cdot 0,955 = 413,1 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu obciążenia

$$P_m = T \frac{\pi n_N}{30} = 16,9 \cdot \frac{\pi \cdot 187,5}{30} = 331,66 \text{ kW}$$

Straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia warunkach pracy są mniejsze od znamionowych

$$\Delta P_f = U_f I_f = 28,8 \cdot 624 \cdot 10^{-3} = 18 \text{ kW}$$

Sprawność silnika w warunkach pracy

$$\eta = \frac{P_m}{P_1 + \Delta P_f} 100 = \frac{331,66}{413,1 + 18} 100 = 77\%$$

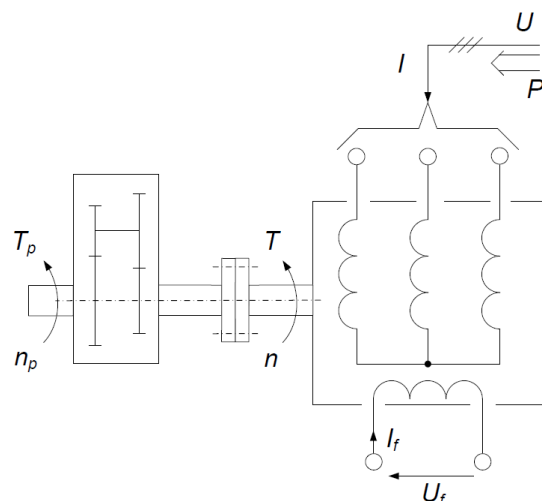
Silnik jest niskoobrotowy i ma duży gabaryt, pracuje przy obciążeniu 2/3 mocy znamionowej, napięcie sieci jest podwyższone, w sumie to powoduje, że straty mocy w silniku są duże, a sprawność jest niska.

4. Sprawność energetyczna układu napędowego złożonego z silnika synchronicznego i przekładni mechanicznej

Układ napędowy maszyny roboczej można rozwiązać stosując silnik synchroniczny o liczbie par biegunów $p = 2$ i przekładnię mechaniczną zębatą o przełożeniu $i = 8$. Ponadto silnik może być o mniejszej mocy znamionowej: $P_N = 500 \text{ kW}$, $U_N = 6 \text{ kV}$, $I_N = 55 \text{ A}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, $n_N = 1500 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_N = 0,90$, $T_N = 3185 \text{ N}\cdot\text{m}$. Parametry znamionowe wzbudzenia DC: $U_{fN} = 40 \text{ V}$, $I_{fN} = 96 \text{ A}$. Parametry pracy silnika w stanie ustalonym: $U = 6300 \text{ V}$, $I = 39,6 \text{ A}$, $P_1 = 413,1 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,95$, $f = 50 \text{ Hz}$,

$$n = 1500 \text{ obr/min}, \quad T = 2130 \text{ N}\cdot\text{m}, \\ U_f = 28,8 \text{ V}, \quad I_{fN} = 69 \text{ A}.$$

Sprawność znamionowa silnika plus sprawność przekładni w warunkach znamionowych.



Rys. 2. Ilustracja układu napędowego silnik plus przekładni mechanicznej

W znamionowych warunkach pracy silnik pobiera z sieci elektroenergetycznej moc

$$P_{1N} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 55 \cdot 0,9 = 514,4 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu znamionowego

$$P_N = T_N \frac{\pi n_N}{30} = 3185 \cdot \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 500 \text{ kW}$$

Moc $P_N = 500 \text{ kW}$ jest podana na tabliczce znamionowej.

Straty mocy w znamionowych warunkach pracy

$$\Delta P_N = P_{1N} - P_N + U_{fN} I_{fN} = 541,4 - 500 + 40 \cdot 96 \cdot 10^{-3} = 18,26 \text{ kW}$$

Sprawność znamionowa silnika

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_N} 100 = \frac{500}{500 + 18,26} 100 = 96,5\%$$

Obliczenie strat mocy i sprawności dla warunków pracy silnika. Moc pobiera z sieci elektroenergetycznej

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 35 \cdot 0,95 = 345,5 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu

$$P_m = T \frac{\pi n_N}{30} = 2,13 \cdot \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 334,4 \text{ kW}$$

Straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia w warunkach pracy są mniejsze

$$\Delta P_f = U_f I_f = 28,8 \cdot 69 \cdot 10^{-3} = 1,99 \text{ kW}$$

Sprawność silnika w warunkach pracy

$$\eta_s = \frac{P_m}{P_1 + \Delta P_f} 100 = \frac{334,4}{345,5 + 1,99} 100 = 96,2\%$$

Sprawność układu napędowego przy sprawności przekładni $\eta_p = 97\%$, jest to dolna granica sprawności przekładni

$$\eta = \frac{\eta_s \eta_p}{100 \cdot 100} \cdot 100 = 0,965 \cdot 0,97 \cdot 100 = 93,3\%$$

Silnik o liczbie par biegunów $p = 2$ plus przekładnia mechaniczna stanowi napęd alternatywny do silnika o liczbie par biegunów $p = 16$. Silnik napędza maszynę roboczą poprzez przekładnię mechaniczną o redukcji prędkości obrotowej 1500/187,5 obr/min. Sprawność układu napędowego jest o 16% większa od sprawności samego silnika niskoobrotowego.

5. Sprawność energetyczna układu napędowego złożonego z silnika indukcyjnego klatkowego i przekładni mechanicznej

Taki sam układ napędowy można zestawić z silnika indukcyjnego katalogowego i przekładni mechanicznej o przełożeniu $i = 8$. Parametry znamionowe silnika indukcyjnego: $P_N = 500 \text{ kW}$, $U_N = 6 \text{ kV}$, $I_N = 60 \text{ A}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, $n_N = 1489 \text{ obr/min}$, $\cos \varphi_N = 0,83$, $T_N = 3207 \text{ N}\cdot\text{m}$, sprawność $\eta_N = 96,5\%$. Silnik napędza maszynę roboczą i pracuje w stanie ustalonym przy parametrach: $U = 6000 \text{ V}$, $I = 48 \text{ A}$, $P_1 = 400 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,95$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\cos \varphi_N = 0,82$, $n = 1491 \text{ obr/min}$, $T = 2446 \text{ N}\cdot\text{m}$. Jest to silnik katalogowy produkowany przez Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S. A. w Żychlinie. Zakład EMIT należy do Cantoni Grup.

W znamionowych warunkach pracy silnik pobiera z sieci elektroenergetycznej moc

$$P_{1N} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 60 \cdot 0,83 = 517,5 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu znamionowego

$$P_N = T_N \frac{\pi n_N}{30} = 3207 \cdot \frac{\pi \cdot 1489}{30} = 500 \text{ kW}$$

Moc $P_N = 500 \text{ kW}$ jest podana na tabliczce znamionowej.

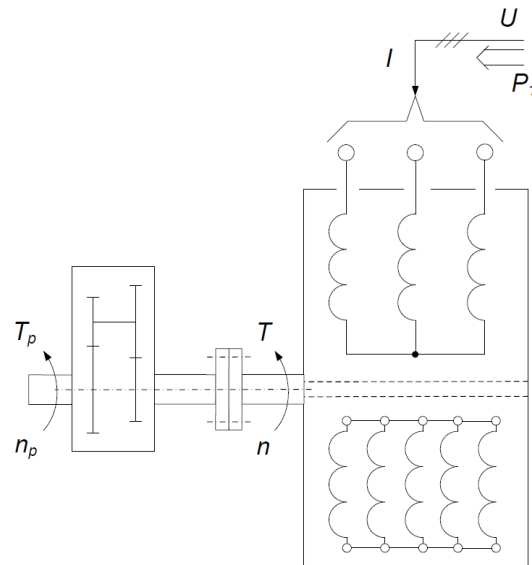
Straty mocy w znamionowych warunkach pracy

$$\Delta P_N = P_{1N} - P_{mN} = 517,5 - 499,8 = 17,7 \text{ kW}$$

Sprawność znamionowa silnika

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_N} 100 = \frac{500}{500 + 17,7} 100 = 96,5\%$$

Silnik indukcyjny pobiera z sieci elektroenergetycznej, oprócz mocy czynnej, moc bierną indukcyjną, sprzyja to obniżeniu napięcia sieci. Dlatego w warunkach pracy uwzględniamy napięcie sieci 6000 V.



Rys. 3. Ilustracja układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym

Straty mocy i sprawności dla warunków pracy silnika. Moc pobiera z sieci elektroenergetycznej

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 48 \cdot 0,80 = 399 \text{ kW}$$

Moc mechaniczna na wale silnika wyliczona z momentu obciążenia

$$P_m = T \frac{\pi n_N}{30} = 2446 \cdot \frac{\pi \cdot 1491}{30} \cdot 10^{-3} = 381,7 \text{ kW}$$

Sprawność silnika w warunkach pracy

$$\eta_s = \frac{P_m}{P_1} 100 = \frac{381,7}{399} 100 = 95,7\%$$

Sprawność układu napędowego przy sprawności przekładni $\eta_p = 97\%$

$$\eta = \frac{\eta_s \eta_p}{100 \cdot 100} \cdot 100 = 0,957 \cdot 0,97 \cdot 100 = 92,8\%$$

Sprawność energetyczna silnika indukcyjnego plus przekładnia mechaniczna jest równa 92,8% i jest tylko 0,5% mniejsza od sprawności silnika synchronicznego plus przekładnia mechaniczna.

Silnik indukcyjny jest znacznie łatwiejszy w obsłudze w czasie eksploatacji niż silnik synchroniczny, np. przy rozruchu i przy zaburzeniach napięcia w sieci [3, 4, 5].

6. Podsumowanie

Moment znamionowy maszyny elektrycznej determinuje jej gabaryt. Maszyny wolnoobrotowe mają większą objętość i masę od maszyn o tej samej mocy znamionowej lecz wyższej znamionowej prędkości obrotowej.

Sprawność energetyczna maszyny obciążonej mocą znacznie mniejszą od mocy znamionowej ma także sprawności mniejszą od znamionowej. Porównano sprawność energetyczną trzech układów napędowych napędzających maszynę roboczą z prędkością obrotową 187,5 obr/min i wykazano, że sprawność silnika synchronicznego o liczbie par biegunów uzwojenia twornika $p = 16$, w warunkach pracy, wynosi 77% i jest mniejsza o 16% od sprawności silnika synchronicznego i silnika indukcyjnego, o liczbie par biegunów $p = 2$, plus przekładnie mechaniczne o przełożeniu $i = 8$.

Silniki synchroniczny i indukcyjny, o liczbie par biegunów $p = 2$, plus przekładnie mechaniczne o przełożeniu $i = 8$ stanowią napędy alternatywne do silnika synchronicznego niskoobrotowego o liczbie par biegunów $p = 16$. Silniki synchroniczny i indukcyjny, o liczbie par biegunów $p = 2$, plus przekładnie mechaniczne są

energooszczędne w stosunku do silnika synchronicznego o liczbie par biegunów $p = 16$.

Literatura

- [1]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T.: *Energooszczędne silniki indukcyjne*. Napędy i Sterowanie. Nr. 2 2019. ISSN 1507-7764. Str. 88-91.
- [2]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T.: *Porównanie strat mocy i sprawności silników w różnych wariantach rozwiązania*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. ISSN 0239-3646. Nr 121, 1/2019 r. str., 135 – 139.
- [3]. Glinka T.: *Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego*. Napędy i Sterowanie. Nr. 5/2019. ISSN 1507-7764. Str. 74 – 79.
- [4]. Glinka T.: *Dynamika silnika indukcyjnego i synchronicznego po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. ISSN 0239-3646. Nr 113, 1/2017 r. str., 1 - 14.
- [5]. Glinka T.: *Dynamika silnika synchronicznego po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia*. Energetyka. Nr 8/2017. Str. 489 – 497.
- [6]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. ISBN 978-83-01-20115-9. Wydawnictwo WNT 2018 r. Rozdział 8. *Elektryczne energooszczędne układy napędowe*. Str.308 – 326. Rozdział 9. *Związek między mocą znamionową a gabarytem maszyny elektrycznej i transformatora*. Str. 327 – 330.
- [7]. Owczarzy A.: *Nowe wymagania w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników asynchronicznych*. Napęd i Sterowanie. . Nr. 1/2021. ISSN 1507-7764. Str. 10-12.