

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

PORÓWNANIE STRAT MOCY I SPRAWNOŚCI SILNIKÓW W RÓŻNYCH WARIANTACH ROZWIĄZANIA

EFFICIENCY AND POWER LOSSES OF MOTORS IN VARIOUS VARIANTS OF THE SOLUTION

Streszczenie: Układy napędowe maszyn wyciągowych, na szybach wydobywczych w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi, bazują na silnikach prądu stałego wzbudzanych elektromagnetycznie. Sprawność energetyczna tych silników wynosi około 90%. W artykule przedstawiono silniki alternatywne:

- silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi,
- silnik wzbudzany magnesami trwałymi i komutacją elektroniczną.

Sprawność wymienionych silników jest większa, a ilość traconej energii w silnikach jest mniejsza.

Abstract: The drive systems of winding machines, on production shafts of coal mines and copper ores mines, are based on electromagnetically excited DC motors. The energy efficiency of these motors is around 90%. The alternative motors are presented in the article:

- DC motor excited by permanent magnets,
- a motor excited by permanent magnets and electronic commutation.

The efficiency of these motors are greater, and the amount of energy lose in motors are smaller.

Słowa kluczowe: maszyny wyciągowe, silniki prądu stałego, magnesy trwałe, rozpraszanie energii

Keywords: production shaft, DC motors, permanent magnets, energy dissipation

1. Wstęp

Inspiracją do napisania tego artykułu jest silnik prądu stałego napędzający maszynę wyciągową w jednej z kopalń węgla kamiennego. Silnik napędzający maszynę wyciągową ma parametry: 1800 kW, 800 V, 2445 A, 70 obr/min. Prędkość projektowa skipów maszyny wyciągowej wynosiła 24 m/s, lecz maszyna wyciągowa ma dopuszczenie WUG do 12 m/sek. Przy jeździe ustalonej silnik pracował przy połowie prędkości obrotowej, to jest przy napięciu zasilania 400 V, lecz przy znamionowym momencie obciążenia.

Warunki pracy znamionowej silnika

Sprawność znamionowa

$$\eta_N = \frac{P_N}{U_N I_N} \cdot 100\% = \frac{1800}{800 \cdot 2445} \cdot 100\% = 92\%$$

Straty znamionowe mocy

$$\Delta P_N = U_N I_N - P_N = 800 \cdot 2445 \cdot 10^{-3} - 1800 = 156 \text{ kW}$$

Wymienione straty obejmują

$$\Delta P_N = \Delta P_{fN} + \Delta P_{CuN} + \Delta P_{FeN}$$

Oznaczenia:

P_N – moc znamionowa, U_N – napięcie znamionowe, I_N – prąd znamionowy,

ΔP_{fN} – straty mocy w: uzwojeniu wzbudzenia i straty dodatkowe w nabiegunkach biegunów wzbudzenia,

ΔP_{CuN} – straty w uzwojeniach obwodu twornika: wirnika, biegunów komutacyjnych i kompensacyjnym oraz na komutatorze,

ΔP_{FeN} – straty w żelazie wirnika i straty mechaniczne. Jeśli przyjąć przybliżone proporcje podziału strat zakładane przy projektowaniu maszyny [2],

$$\Delta P_{FeN} \approx \frac{1}{2} \Delta P_{CuN},$$

$$\Delta P_{fN} \approx \frac{1}{3} \Delta P_{CuN}$$

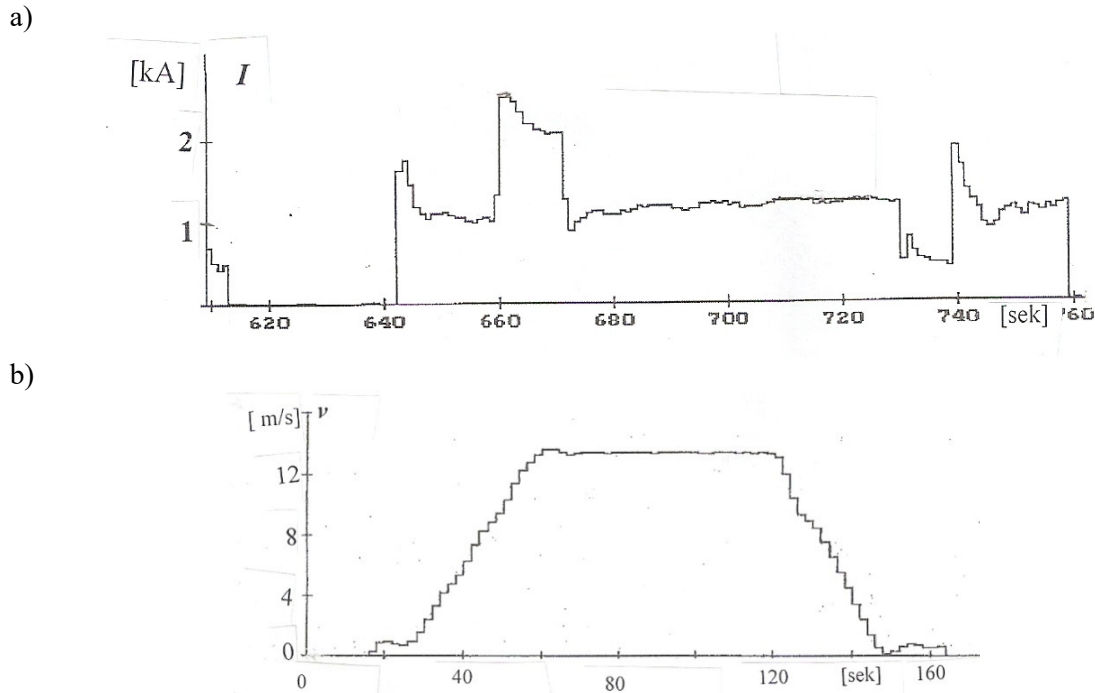
to sumaryczne straty znamionowe

$$\Delta P_N = \Delta P_{fN} + \Delta P_{CuN} + \Delta P_{FeN} \approx \left(\frac{1}{3} + 1 + \frac{1}{2} \right) \Delta P_{CuN} = \frac{11}{6} \Delta P_{CuN}$$

$$\Delta P_{CuN} \approx \frac{6}{11} P_N \frac{1 - \eta_N}{\eta_N} = \frac{6}{11} \cdot 1800 \cdot \frac{1 - 0.92}{0.92} = 85 \text{ kW}$$

Rzeczywiste warunki pracy silnika

Parametry pracy silnika ilustrują przebiegi prądu i prędkości obrotowej na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg prądu silnika w stosunku do obrotów wirnika (a) i prędkości jazdy skipu w czasie jednego wyciągu (b)

W oparciu o zarejestrowany przebieg prądu silnika i prędkości jazdy skipu przyjęto uśrednione parametry pracy silnika:

- prąd I_{FN} i strumień Φ wzbudzenia znamionowe,
- prąd twornika I_N znamionowy,
- moment elektromagnetyczny silnika znamionowy $T_{eN} = \frac{P}{\omega}$,
- straty wzbudzenia ΔP_{FN} znamionowe,
- straty prądowe w obwodzie twornika ΔP_{CuN} znamionowe,
- napięcie przy prędkości ustalonej $U = \frac{1}{2}U_N = 400$ V,
- prędkość obrotowa wirnika $n = \frac{1}{2}n_N = 35$ obr/min, $\omega = \pi \frac{n}{30} = \frac{1}{2}\omega_N$,
- częstotliwość przemagnesowania wirnika $f = \frac{\omega}{2\pi}p$,
- silnik pracuje z mocą $P \approx \frac{1}{2}P_N = 900$ kW.

Straty w żelazie wirnika są mniejsze od znamionowych, ponieważ są to straty rotacyjne zależne od kwadratu częstotliwości, założono $\Delta P_{Fe} \approx \frac{1}{4}\Delta P_{FeN}$.

Sumaryczne straty mocy

$$\Delta P \approx \Delta P_{fN} + \Delta P_{CuN} + \frac{1}{4}\Delta P_{FeN} \approx \left(\frac{1}{3} + 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}\right)$$

$$\Delta P_{CuN} = \frac{35}{24}\Delta P_{CuN} = \frac{35}{24}85 = 124 \text{ kW}$$

Sprawność silnika w warunkach pracy

$$\eta \approx \frac{\frac{1}{2}P_N}{\frac{1}{2}P_N + \Delta P} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 124} \cdot 100\% =$$

$$= 87.9\%$$

Sprawność silnika w warunkach pracy jest o ponad cztery procent mniejsza od sprawności znamionowej.

2. Zmniejszenie mocy znamionowej silnika prądu stałego

Zmniejszenie strat mocy i podwyższenie sprawności silnika prądu stałego wzbudzanego elektromagnetycznie jest możliwe, gdy zmniejszy się gabaryt silnika. Gabaryt silnika, to jest jego objętość V i masa m , które są determinowane przez znamionowy moment elektromagnetyczny T_{eN} znamionowy [1].

$$T_{eN} = \frac{P_N}{\omega_N}$$

$$V = C_V T_{eN}^{\frac{2}{3}}$$

$$m = C_m T_{eN}^{\frac{3}{4}}$$

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

Silnik o mniejszym gabarycie będzie miał mniejszy moment T_e . Maszyna wyciągowa charakteryzuje się stałym momentem mechanicznym T_m , który silnik musi pokonywać, zgodnie z równaniem ruchu

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m$$

$$\omega_m = \pi \frac{n}{30}$$

gdzie: J – jest momentem bezwładności wszystkich mas maszyny wyciągowej i silnika będących w ruchu obrotowym i liniowym spowodowany na wał silnika.

Moment mechaniczny T_m maszyny wyciągowej można zmniejszyć zmniejszając średnicę koła linowego i aby prędkość naczynia wydobywczego nie zmieniła się, należy zwiększyć proporcjonalnie prędkość obrotową silnika.

Załóżmy, że zmienimy dwukrotnie średnicę koła linowego, wówczas moment zmniejszy się dwukrotnie ($T'_m = \frac{1}{2} T_m$). Moc silnika zmniejszy się dwukrotnie, lecz prędkość obrotowa (kątowna) wirnika silnika wzrośnie dwukrotnie

$$P' = \frac{1}{2} P_N$$

$$\omega'_m = \omega_{mN}$$

Masa silnika zmniejszy się

$$m' = m \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3}{4}} \approx 0,6m$$

Dane znamionowe nowego silnika: 900 kW, 800 V, 1242 A, 70 obr/min.

Silnik będzie pracował, przy prędkości ustalonej, przy parametrach znamionowych. W stanach rozruchowych będzie przeciążany, zgodnie z wyżej podanym równaniem ruchu. Chwilowe przeciążenia silnika prądu stałego do wartości $2T_{eN}$ są dopuszczalne.

Straty mocy $\Delta P'$ w silniku są proporcjonalne do masy

$$\Delta P' = \Delta P_N \frac{m'}{m} = 156 \cdot 0,6 \approx 94 \text{ kW}$$

Sprawność silnika

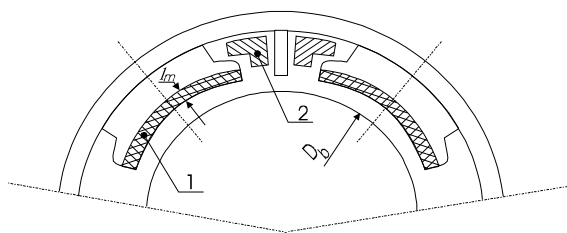
$$\eta' = \frac{P'}{P' + \Delta P'} \cdot 100\% = \frac{900}{900 + 94} \cdot 100\%$$

$\approx 90.5\%$

Silnik ma wyższą sprawność o ok. trzech procent w stosunku do silnika obecnego, co przekłada się na mniejsze o 30 kW straty mocy w silniku.

3. Wzbudzenie silnika magnesami trwałymi

Straty mocy w silniku można jeszcze zmniejszyć. Maszyny wyciągowe, windy i wiele innych maszyn roboczych obciążają wały silników stałym momentem $T_m = \text{const}$. Silniki napędzające te maszyny robocze pracują w pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej $n = f(U)$, przy stałym momencie elektromagnetycznym $T_e = \text{const}$, bez względu na rodzaj silnika. Zatem strumień magnetyczny wzbudzenia jest stały $\Phi = \text{const}$. Jeśli tak, to do wzbudzenia można zastosować magnesy trwałe. Silniki komutatorowe prądu stałego, do mocy około 100 kW, nie wymagają stosowania uzwojenia kompensacyjnego. W silnikach tych magnesy trwałe można umieścić przy szczelinie magnetycznej. W celu zapewnienia poprawnej komutacji prądu, silniki muszą mieć bieguny komutacyjne. Uzwojenie biegunów komutacyjnych ma pewną objętość i musi mieć swoją przestrzeń w maszynie, dlatego magnesy trwałe są zabudowane na pieńkach, jak na rys. 2.



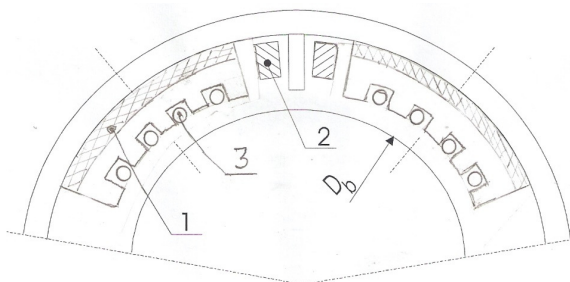
Rys. 2. Szkic stojana silnika prądu stałego 1 – magnesy trwałe, 2 - uzwojenie biegunów komutacyjnych

Silniki komutatorowe prądu stałego większej mocy mają uzwojenie kompensacyjne.

Celem stosowania uzwojenia kompensacyjnego jest wyrównanie rozkładu napięcia na komutatorze przy obciążeniu. Rozkład napięcia na komutatorze odpowiada rozkładowi indukcji w szczelinie. Siła magnetomotoryczna uzwojenia kompensacyjnego kompensuje siłę magnetomotoryczną uzwojenia twornika i wyrównuje rozkład indukcji w szczelinie pod biegunami wzbudzenia, tym samym wyrównuje rozkład

napięcia na komutatorze. Nierównomierny rozkład napięcia na komutatorze stwarza zagrożenie zwarcia łukowego między działkami o zbyt dużym napięciu. Zwarcie takie powstaje na komutatorze w strefie między mostami szczotek i rozwija się w łuk okrężny na komutatorze. Łuk okrężny powoduje awarię maszyny. Zagrożenie powstania łuku okrężnego występuje, gdy napięcie między dwoma sąsiednimi działkami komutatora przekracza 30 V. Zdarza się to w stanach przeciążenia i w maszynach pracujących przy dużym odwzbudaniu.

Należy podkreślić, że jeśli jest stosowane wzbudzenie magnesami trwałymi umieszczonymi przy szczelinie, jak na rys. 2, to deformacja rozkładu indukcji w szczelinie jest znacznie mniejsza od deformacji przy wzbudzeniu elektromagnetycznym, gdyż permeancja magnesów trwałych jest zbliżona do permeancji powietrza. Ta właściwość magnesów trwałych umożliwia znaczne zwiększenie granicy mocy znamionowej silników, od której należy stosować uzwojenie kompensacyjne. Rozpatrywany w punkcie 2 silnik napędowy maszyny wyciągowej ma moc znamionową 900 kW i musi mieć uzwojenie kompensacyjne. Siła magnetomotoryczna uzwojenia kompensacyjnego działa w osi biegunów komutacyjnych, zatem uzwojenie biegunów komutacyjnych ma odpowiednio mniej zwojów i mniejszą objętość. Jeśli w maszynie jest stosowane uzwojenie kompensacyjne, to korzystnie jest magnesy trwałe umieścić przy jarzmie, jak na rys. 3. W tym przypadku uzwojenie biegunów komutacyjnych jest mniejsze i mieści się w strefie między biegunami wzbudzenia i komutacyjnymi.



Rys. 3. Silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi - 1, 2 - uzwojenie biegunów komutacyjnych, 3 - uzwojenie kompensacyjne

Analizujemy straty i sprawność silnika prądu stałego wzbudzanego magnesami trwałymi o parametrach znamionowych przedstawionych w punkcie 2. Straty mocy wzbudzenia

$$\Delta P_f = 0$$

Pozostałe straty mocy

$$\Delta P'' \approx \frac{m'}{m} (\Delta P_{CuN} + \Delta P_{FeN}) \approx 0,6 \left(1 + \frac{1}{2}\right)$$

$$|\Delta P_{CuN} = 0,9 \cdot 85 = 76,5 \text{ kW}$$

$$\eta'' \approx \frac{P''}{P'' + \Delta P''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 76,5} \cdot 100\% = 92,1\%$$

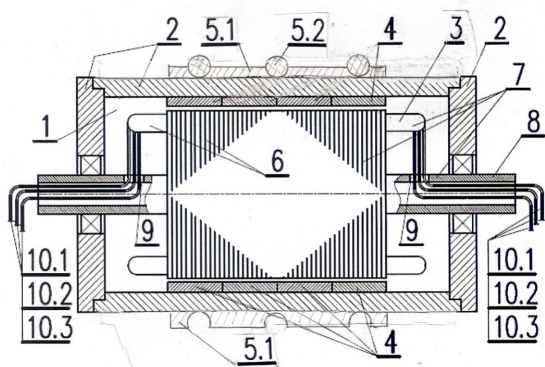
Sprawność silnika wzrasta o jeden procent i straty mocy zmniejszają się o 17,5 kW.

4. Silnik wzbudzony magnesami trwałymi z komutacją elektroniczną

Silnik z komutacją elektroniczną ma zewnętrzny wirnik i wewnętrzny stojan umieszczony na nieruchomym wale. Wirnik silnika pełni funkcję koła linowego. Liny na wirniku mogą być nawinięte dwa, a nawet trzy razy, co zabezpiecza je przed poślizgiem. Powierzchnia zewnętrzna jarzma 2 wirnika jest bębniem, na którym jest osadzone koło linowe 5.1, na którym są nawinięte liny 5.2. Na linach są zawieszony skipy maszyny wyciągowej. Rozwiązanie takie pokazano na rys. 4

Silnik 1 z zewnętrznym wirnikiem, dedykowany do bezprzekładniowego napędu ma zintegrowaną budowę jarzma 2 obwodu magnetycznego wirnika z kołem 5.1 linowym nawiniętych na nim linach 5.2. Na średnicy wewnętrznej jarzma 2 wirnika są przymocowane magnesy trwałe 4, zwykle poprzez klejenie. Stojan 7, to jest pakiet blach 6 wraz z uzwojeniem 3, jest nieruchomy i jest osadzony na nieruchomym wale 8. W wale 8 są wydrążone otwory 9 służące do wyprowadzenia przewodów: zasilających 10.1, przewodów sterowniczych 10.2 i przewodów czujnikowych 10.3.

Zintegrowana budowa silnika elektrycznego 1 wzbudzanego magnesami trwałymi 4 z jarzmem 2 będącym równocześnie bębniem, z osadzonym na nim kołem linowym 5.1, upraszcza mechanikę napędu, eliminuje przekładnię mechaniczną i sprzęgło. Silnik 1 wzbudzany magnesami trwałymi 4 zasilany z komutatora elektronicznego ma duży moment obrotowy i nie wymaga przekładni mechanicznej, umożliwia regulację prędkości obrotowej koła linowego 5.1 i ma wysoką sprawność.



Rys. 4. Silnik z zewnętrznym wirnikiem ma na jarzmie wirnika nałożone koło linowe

W silniku nie ma komutatora i szczotek oraz uzwojeń biegunów komutacyjnych i kompensacyjnego, zatem straty w uzwojeniu twornika zmniejszają się o połowę. Straty mocy i sprawność silnika w stosunku do rozwiązania przedstawionego w punkcie 3 wynoszą

$$\Delta P''' \approx \frac{m'}{m} \left(\frac{1}{2} \Delta P_{CUN} + \Delta P_{F\&N} \right) \approx 0,6 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right)$$

$$\Delta P_{CUN} = 0,6 \cdot 85 = 51 \text{ kW}$$

$$\eta''' \approx \frac{P'''}{P''' + \Delta P'''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 51} \cdot 100\%$$

$$= 94,6\%$$

Sprawność silnika wzrasta do 94,6%, a straty mocy są mniejsze się w stosunku do rozwiązania silnika z punktu 3 o 25,5 kW.

5. Wnioski

Przedstawiono cztery wariantowe rozwiązania układu napędowego maszyny wyciągowej. W punkcie 1 układ napędowy pracujący w jednej z kopalń węgla kamiennego i trzy układy alternatywne dopasowane parametrami znamio-

nowymi do momentu obciążenia i prędkości obrotowej maszyny wyciągowej. Wszystkie silniki realizują ten sam program pracy. Analizowano straty mocy i sprawność tych układów. Podsumowanie wyników zestawiono w tabeli 1. W tabeli podano: parametry pracy silników, straty mocy, sprawność i rozproszenie energii zamienianej na ciepło w czasie 120 sekund, to jest w jednym cyklu jazdy maszyny wyciągowej, jak na rys. 1. Obliczenie przeprowadzono przyjmując, w czasie jazdy, uśrednioną wartość strat mocy.

Tabela 1. Straty i sprawność układów napędowych

| Silnik analizowany w punkcie | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|------|------|------|
| Moc [kW] | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Napięcie [V] | 400 | 800 | 800 | 800 |
| Prąd [A] | 2445 | 1242 | 1242 | 1242 |
| Prędkość obrotowa [obr/min] | 35 | 70 | 70 | 70 |
| Straty mocy [kW] | 124 | 94 | 76,5 | 25,5 |
| Sprawność [%] | 87,9 | 90,5 | 92,0 | 94,6 |
| Rozproszenie energii [kWh] w czasie 120 sek. | 4,13 | 3,14 | 2,55 | 0,85 |

Literatura

- [1]. Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory. PWN 2018. ISBN 978-83-01-20115-9.
- [2]. Kordecki A.: Budowa maszyn elektrycznych. Projektowanie maszyn prądu stałego. WNT, 1973.
- [3]. Szklarski L., Zarudzki J.: Maszyny wyciągowe. PWN, Warszawa 1998. ISBN 83-01-12581-0.