

# Porównanie strat mocy i sprawności silników w różnych wariantach rozwiązania

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

## 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 ta ma dopuszczenie WUG do 12 m/s. 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;
- $\Delta P_{fN}$  – straty mocy w: uzwojeniu wzbudzenia i straty dodatkowe w nabiegunnikach biegunów wzbudzenia;
- $\Delta P_{CuN}$  – straty w uzwojeniach obwodu twornika: wirnika, biegunów komutacyjnych i kompensacyjnym oraz na komutatorze;
- $\Delta P_{FeN}$  – 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

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

**Streszczenie:** Układy napędowe maszyn wyciągowych na sztach 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.

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

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

**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.

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

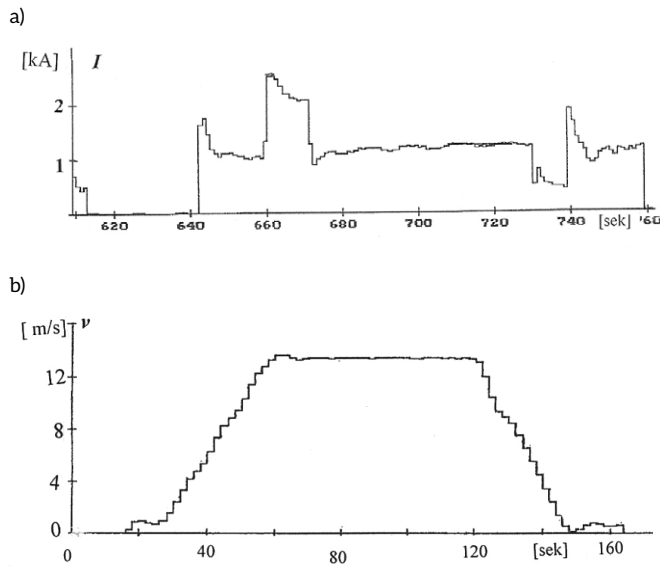
$$\Delta P_{CuN} \approx \frac{6}{11} P_N \frac{1-\eta_N}{\eta_N} = \frac{6}{11} \cdot 1800 \cdot \frac{1-0,92}{0,92} = 85 \text{ kW}$$

### Rzeczywiste warunki pracy silnika

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

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

- prąd  $I_{fN}$  i strumień  $\Phi$  wzbudzenia znamionowe;
- prąd twornika  $I_N$  znamionowy;
- moment elektromagnetyczny silnika znamionowy  $T_{eN} = \frac{P}{\omega}$ ;
- straty wzbudzenia  $\Delta P_{fN}$  znamionowe;
- straty prądowe w obwodzie twornika  $\Delta P_{CuN}$  znamionowe;



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

- napięcie przy prędkości ustalonej  $U = \frac{1}{2} U_N = 400$  V;
- prędkość obrotowa wirnika  $n = \frac{1}{2} n_N = 35$  obr./min,  
 $\omega = \pi \frac{\omega}{30} = \frac{1}{2} \omega_N$ ;
- 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

$$\begin{aligned} \Delta P &\approx \Delta P_{fN} + \Delta P_{CuN} + \frac{1}{4} \Delta P_{FeN} \approx \left(\frac{1}{3} + 1 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}\right) \Delta P_{CuN} = \frac{35}{24} \Delta P_{CuN} = \frac{35}{24} 85 = \\ &= 124 \Delta P \approx \Delta P_{fN} + \Delta P_{CuN} + \frac{1}{4} \Delta P_{FeN} \approx \\ &\approx \left(\frac{1}{3} + 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}\right) \Delta P_{CuN} = \frac{35}{24} \Delta P_{CuN} = \\ &= \frac{35}{24} 85 = 124 \text{ kW} \end{aligned}$$

Sprawność silnika w warunkach pracy:

$$\eta \approx \frac{\frac{1}{2} P_N}{\frac{1}{2} P_N + \Delta P} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 124} \cdot 100\% = 87.9\%$$

$$\eta \approx \frac{\frac{1}{2} P_N}{\frac{1}{2} P_N + \Delta P} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 124} \cdot 100\% = 87.9\%$$

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  $T_{eN}$  [1].

$$\begin{aligned} T_{eN} &= \frac{P_N}{\omega_N} \\ V &= C_V T_{eN}^{\frac{3}{4}} \\ m &= C_m T_{eN}^{\frac{3}{4}} \\ \omega_N &= \pi \frac{n_N}{30} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_m}{dt} &= T_e - T_m \\ \omega_m &= \pi \frac{n}{30} \end{aligned}$$

gdzie:  $J$  – jest momentem bezwładności wszystkich mas maszyny wyciągowej i silnika będących w ruchu obrotowym i liniowym spowodzonym 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.

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

$$\begin{aligned} P' &= \frac{1}{2} P_N \\ \omega'_m &= \omega_{mN} \end{aligned}$$

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:

$$\eta' = \frac{P'}{P' + \Delta P'} \cdot 100\% = \frac{900}{900 + 94} \cdot 100\% \approx 90.5\%$$

$$\eta' = \frac{P'}{P' + \Delta P'} \cdot 100\% = \frac{900}{900 + 94} \cdot 100\% \approx 90.5\%$$

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.

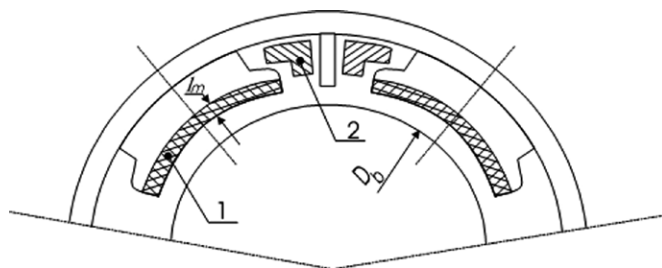
### 3. Wzbudzenie silnika magnesami trwałymi

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.

Silniki komutatorowe prądu stałego większej mocy mają uzwojenie kompensacyjne.

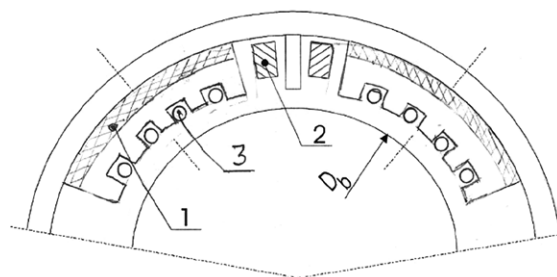
Celem stosowania uzwojenia kompensacyjnego jest wyrównanie rozkładu napięcia na komutatorze przy obciążeniu. Rozkład napięcia na komutatorze odpowiada rozkładowi indukcji w szczelinie. Siła magnetomotoryczna uzwojenia kompensacyjnego kompensuje siłę magnetomotoryczną uzwojenia twornika i wyrównuje rozkład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

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



Rys. 2. Szkic stojana silnika prądu stałego:

1 – magnesy trwałe; 2 – uzwojenie biegunów komutacyjnych



Rys. 3. Silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi:

1, 2 – uzwojenie biegunów komutacyjnych; 3 – uzwojenie kompensacyjne

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.

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:

$$\begin{aligned} \Delta P'' &\approx \frac{m}{m'} (\Delta P_{CuN} + \Delta P_{FeN}) \approx 0,6 \left( 1 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \right) \Delta P_{CuN} = 0,9 \cdot 85 = 76,5 \Delta P'' \approx \\ &\approx \frac{m'}{m} (\Delta P_{CuN} + \Delta P_{FeN}) \approx 0,6 \left( 1 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \right) \Delta P_{CuN} = 0,9 \cdot 85 = 76,5 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\eta'' \approx \frac{P}{P'' + \Delta P''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 76,5} \cdot 100\% = 92.1\%$$

$$\eta'' \approx \frac{P}{P'' + \Delta P''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 76,5} \cdot 100\% = 92.1\%$$

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 linowym (5.1) i 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) wzbudzonego 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.

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:

$$\begin{aligned} \Delta P''' &\approx \frac{m'}{m} \left( \frac{1}{2} \Delta P_{Cun} + \Delta P_{FeN} \right) \approx 0,6 \left( \frac{1}{2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \right) \Delta P_{CUN} = 0,6 \cdot 85 = 51 \Delta P''' \approx \\ &\approx \frac{m'}{m} \left( \frac{1}{2} \Delta P_{Cun} + \Delta P_{FeN} \right) \approx 0,6 \left( \frac{1}{2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \right) \Delta P_{CUN} = 0,6 \cdot 85 = 51 \text{ kW} \end{aligned}$$

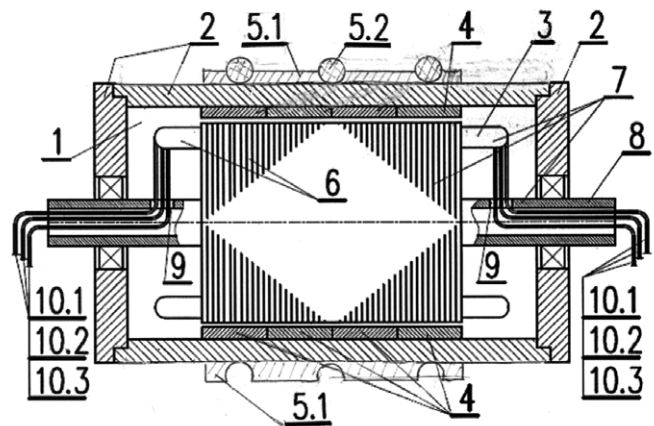
$$\eta''' \approx \frac{P'''}{P''' + \Delta P'''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 51} 100\% = 94,6\%$$

$$\eta''' \approx \frac{P'''}{P''' + \Delta P'''} \cdot 100\% \approx \frac{900}{900 + 51} 100\% = 94,6\%$$

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

#### 5. Wnioski

Prezentowano 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 znamionowymi do



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

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 s	4,13	3,14	2,55	0,85

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.

#### Literatura

- [1] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN 2018.
- [2] KORDECKI A.: *Budowa maszyn elektrycznych. Projektowanie maszyn prądu stałego*. WNT, Warszawa 1973.
- [3] SZKLAŃSKI L., ZARUDZKI J.: *Maszyny wyciągowe*. PWN, Warszawa 1998.

artykuł recenzowany

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