

Straty tarcia o powietrze w silniku PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym

Streszczenie. Artykuł dotyczy wyznaczania strat tarcia o powietrze w wysokoobrotowym bezszczotkowym silniku prądu stałego (PM BLDC) z wirnikiem zewnętrznym. W silniku o takiej konstrukcji, straty tarcia o powietrze są znacznie większe niż w silniku pracującym w typowym zakresie prędkości obrotowej. W artykule zaproponowano własną metodę wyznaczania strat tarcia o powietrze dla silników z wirnikiem zewnętrznym. Rozważania teoretyczne poparto badaniami laboratoryjnymi na prototypowym wysokoobrotowym silniku PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym.

Abstract. The article concerns the determination of air friction losses in a high speed brushless DC motor (PM BLDC) with an external rotor. In a motor of such a design, air friction losses are much higher than in a motor operating in a typical speed range. The authors in the paper propose their own method of determining air friction losses for motors with an external rotor. Theoretical considerations have been supported by laboratory tests on a prototype of high-speed PM BLDC motor with an external rotor. (*Air friction losses in the PM BLDC motor with external rotor*).

Słowa kluczowe: Bezszczotkowy silnik prądu stałego z wirnikiem zewnętrznym, wysokoobrotowy silnik PM BLDC, straty tarcia o powietrze, magazyn energii

Keywords: Brushless DC motor with external rotor, high speed PM BLDC motor, air friction losses, energy storage

Wstęp

W typowych silnikach elektrycznych z wirnikiem wewnętrznym, pracujących w typowych zakresach prędkości obrotowej, straty mocy spowodowane tarciami wirnika o powietrze nazywane w dalszych rozważaniach stratami tarcia o powietrze, są znacznie mniejsze od pozostałych rodzajów strat w silniku i ich wpływ na sprawność silnika jest nieznaczny, często niezauważalny [1]. W tej sytuacji przybliżona zależność [2]:

$$(1) \quad P_{f_v} = 60 \frac{d_r^4}{p^3} l_r \left(\frac{f}{50} \right)^3$$

w której d_r , l_r oznacza średnicę i długość wirnika, p – liczbę par biegunów a f – częstotliwość, odpowiadająca prędkości obrotowej, pozwala wyznaczyć straty mocy tarcia o powietrze, wyrażone w kilowatach zazwyczaj, z wystarczającą dokładnością. Dokładniejszy opis strat tarcia o powietrze uzyska się korzystając z zależności [3]:

$$(2) \quad P_{f_{air}} = c_f \pi \rho_{air} \omega^3 r_r^4 l_r$$

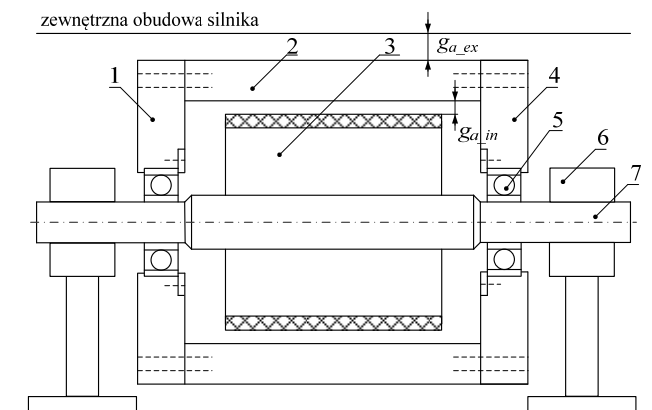
przy czym c_f , ρ_{air} , ω , r_r oraz l_r kolejno oznaczają, współczynnik tarcia, gęstość powietrza, prędkość kątową, promień wirnika, oraz długość maszyny równa długości wirnika.

Dla typowych parametrów silników PM BLDC straty tarcia o powietrze są wyraźnie mniejsze od strat elektrycznych. Sytuacja się zmienia w przypadku silników wysokoobrotowych, gdy straty tarcia o powietrze istotnie wzrastają, są porównywalne ze stratami elektrycznymi, a często są większe lub nawet dużo większe od strat elektrycznych. Jeszcze większy jest udział strat tarcia o powietrze w przypadku silników z wirnikiem zewnętrznym [4]. Spowodowane to jest tym, że silnik z wirnikiem zewnętrznym ma większą średnicę (średnice) oraz, że w silniku z wirnikiem zewnętrznym są dwie powierzchnie trące o powietrze.

Silnik PM BLDC z wirnikiem wewnętrznym

Na rys.1 pokazano uproszczony przekrój poprzeczny silnika PM BLDC składającego się z wirnika w kształcie wydrążonego walca „2” oraz z dwóch pokryw bocznych „1”

i „4” osadzonych na wspólnym wale „7” za pomocą łożysk „5”. Wał, na którym osadzony jest również stojan „3,” podparty jest przez dwie podpory „6”. Kluczowym zadaniem przy wyznaczaniu strat tarcia o powietrze jest znajomość współczynnika tarcia c_f , gdyż wymiary geometryczne silnika oraz gęstość powietrza dla przewidywanych warunków pracy są na ogół znane. W [5] przedstawiono obszernie rozważania na temat wyznaczania współczynnika tarcia. Korzystając z wyników tych rozważań przedstawiono w [6] metodę wyznaczania strat mocy w wysokoobrotowym silniku. Rozważania przedstawione w pracach [5], [6] dotyczyły silników z wirnikiem wewnętrznym. W silniku z wirnikiem zewnętrznym (rys.1) są dwie powierzchnie trące walca wirnika (zewnętrzna i wewnętrzna), a oprócz tego istotną rolę odgrywają powierzchnie boczne wirnika również zewnętrzna i wewnętrzna.



Rys.1. Uproszczony przekrój konstrukcyjny silnika PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym

Przy wyznaczaniu współczynników charakteryzujących tarcie wirnika o powietrze potrzebna jest, oprócz wielkości przedstawionych na rys.2 jeszcze znajomość szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem a stojanem $g_{a_{in}}$ oraz pomiędzy wirnikiem a zewnętrzną obudową $g_{a_{ex}}$.

Wyznaczanie współczynnika tarcia

W literaturze [7] można się spotkać z różnymi metodami wyznaczania współczynnika tarcia c_f . W dalszych rozważaniach zdecydowano się skorzystać z metody przedstawionej w [5], [6]. Wg tej metody współczynnik tarcia c_f dla przebiegów laminarnych, wynosi:

$$(3) \quad c_f = \frac{1,8}{Re} \left(\frac{g_a}{r} \right)^{-0,25} \frac{(r + g_a)^2}{(r + g_a)^2 - r^2}$$

i zależy od liczby Reynoldsa:

$$(4) \quad Re = \frac{r^2 \omega}{\nu}$$

gdzie: g_a - mechaniczna szczelina powietrzna, r - promień wirnika, ν - współczynnik tarcia lepkiego.

Po wprowadzeniu względnej wartości mechanicznej szczeliny powietrznej:

$$(5) \quad g_r = \frac{g_a}{r}$$

można współczynnik tarcia sprowadzić do postaci:

$$(6) \quad c_f = \frac{1,8}{Re} \frac{(1 + g_r)^2}{(2 + g_r) g_r^{1,25}}$$

Parametrem informującym czy przepływ jest laminarny czy turbulentny jest liczba Taylora:

$$(7) \quad Ta = \frac{r \omega g_a}{\nu} \sqrt{\frac{g_a}{r}}$$

Łącząc zależności (4), (5) i (7) można liczbę Taylora sprowadzić do postaci:

$$(8) \quad Ta = Re \cdot g_r^{1,5}$$

Dla $Ta \leq 41,3$ przepływ jest laminarny, a dla $Ta \geq 41,3$ przepływ jest turbulentny. Współczynnik tarcia dla przepływu laminarnego jest określony zależnością (6). Granica pomiędzy przepływem laminarnym i turbulentnym występuje dla $Ta = 41,3$. Z zależności (8), oraz (4) wynika, że dla tej granicy zachodzi:

$$(9) \quad Re_{41,3} = 41,3 \cdot g_r^{-1,5}$$

$$(10) \quad \omega_{41,3} = \frac{\nu \cdot Re_{41,3}}{r^2}$$

oraz

$$(11) \quad c_{f41,3} = \frac{1,8}{Re_{41,3}} \frac{(1 + g_r)^2}{(2 + g_r) g_r^{1,25}}$$

Dla przepływu turbulentnego współczynnik tarcia wynika z zależności:

$$(12) \quad c_f = c_{f41,3} \left(\frac{41,3}{Ta} \right)^{0,2}$$

Tarcie o powietrze powierzchni walcowych

Stratom tarcia określonym zależnością (2) odpowiada moment tarcia o powietrze:

$$(13) \quad M_{f,air} = \frac{P_{f,air}}{\omega} = c_f \pi \rho_{air} \omega^2 r_r^4 l_r$$

Aby wyznaczyć moment tarcia o powietrze należy określić wymiary (promień r_r i długość wirnika l_r) powierzchni trących o powietrze. W wirniku silnika (rys.2) są dwie powierzchnie walcowe trące o powietrze. Są to powierzchnia zewnętrzna walca o promieniu:

$$(14) \quad r_r = r_{r_ex}$$

i długości:

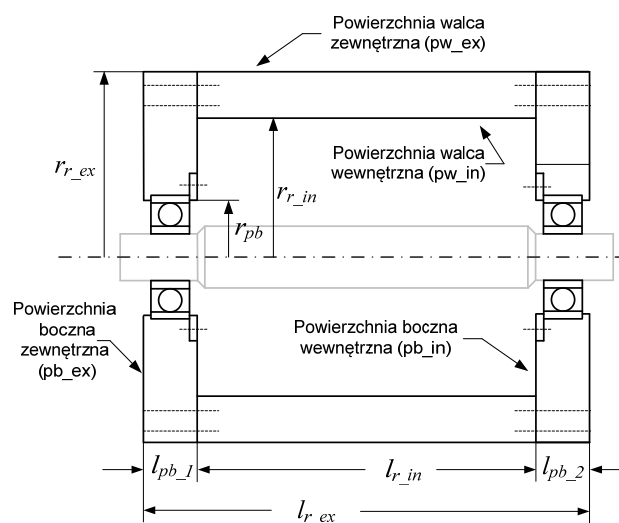
$$(15) \quad l_r = l_{r_ex} = l_{r_in} + l_{pb_1} + l_{pb_2}$$

oraz powierzchnia wewnętrzna walca o promieniu:

$$(16) \quad r_r = r_{r_in}$$

i długości:

$$(17) \quad l_r = l_{r_in}$$



Rys.2. Uproszczony przekrój poprzeczny silnika PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym

Znając wymiary powierzchni trących o powietrze, kolejnym krokiem przy wyznaczaniu momentu tarcia jest wyznaczenie współczynnika tarcia c_f . W przypadku powierzchni zewnętrznej walca, współczynnik tarcia wyznacza się podstawiając w zależnościach (5), (9) – (11), (4), (8), (12) promień walca (14), lepkość powietrza ν oraz prędkość kątową ω . Ostatnim krokiem jest podstawienie obliczonego współczynnika tarcia c_f , gęstości powietrza ρ_{air} , prędkości kątowej ω oraz wymiarów walca (14) i (15) do zależności (13) i wyznaczenie w ten sposób momentu tarcia powierzchni zewnętrznej wirnika o powietrze. Po dokonaniu podstawień zależność opisująca moment tarcia o powietrze powierzchni zewnętrznej walca przybierze postać:

$$(18) \quad M_{f,airpw_ex} = c_f \pi \rho_{air} \omega^2 r_{r_ex}^4 l_{r_ex}$$

Postępując analogicznie wyznacza się moment tarcia o powietrze wewnętrznej powierzchni walca o wymiarach (16) i (17). Po dokonaniu podstawień zależność opisująca moment tarcia o powietrze powierzchni wewnętrznej walca przybierze postać:

$$(19) \quad M_{f,airpw_in} = c_f \pi \rho_{air} \omega^2 r_{r_in}^4 l_{r_in}$$

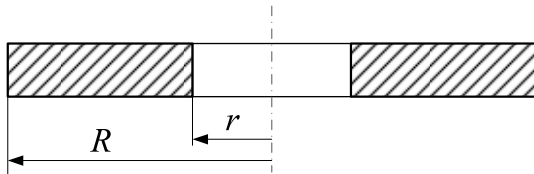
Łączny moment tarcia o powietrze pochodzący od zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni walca:

$$(20) \quad M_{f,airpw} = M_{f,airpw_ex} + M_{f,airpw_in}$$

Należy zwrócić uwagę, że powierzchnie odpowiadające grubości pokryw $l_{pb,1}$ oraz $l_{pb,2}$ współpracują z łożyskami i nie mają wpływu na tarcie o powietrze.

Tarcie o powietrze powierzchni bocznych

W [5] analizowano moment tarcia o powietrze tarczy kołowej wirującej z prędkością ω . Tarczę taką naszkicowano na rys.3.



Rys.3. Tarcza kołowa wirująca w wolnej przestrzeni

Dla tarczy kołowej o pomijalnej grubości wirującej w wolnej przestrzeni współczynnik tarcia o powietrze określony dla obu powierzchni bocznych i przepływu turbulentnego jest określony zależnością:

$$(21) \quad c_{f2} = 0,146 \cdot Re^{-0,2}$$

w której liczba Reynoldsa została określona jako:

$$(22) \quad Re = \frac{R^2 \omega}{\nu}$$

Moment tarcia o powietrze (dla obu powierzchni bocznych) wynika natomiast z zależności:

$$(23) \quad M_{f,airpb,2} = \frac{c}{2} \rho_{air} \omega^2 R^5$$

Moment tarcia o powietrze, dla jednej powierzchni bocznej wyniesie natomiast:

$$(24) \quad M_{f,airpb,1} = \frac{c}{4} \rho_{air} \omega^2 R^5$$

Powierzchnia boczna tarczy kołowej o promieniu R wynosi:

$$(25) \quad S_l = \pi R^2$$

Powierzchnia boczna analizowanego wirnika stanowi tarczę o kształcie pierścienia i powierzchni:

$$(26) \quad S_{pb} = \pi(R^2 - r^2)$$

przy czym r oznacza promień otworu w tarczy. Łącząc zależności (25) i (26) uzyska się wyrażenie:

$$(27) \quad \frac{S_{pb}}{S_l} = 1 - \frac{r^2}{R^2}$$

Przyjmując, że moment tarcia jest proporcjonalny do powierzchni tarcia i korzystając z zależności (24) oraz (27) uzyska się wyrażenie:

$$(28) \quad M_{f,airpb} = \frac{c}{4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \rho_{air} \omega^2 R^5$$

W analizowanym wirniku (rys.2) występują dwie powierzchnie boczne zewnętrzne o promieniu dużym $R = r_{r,ex}$ i promieniu małym $r = r_{pb}$ oraz dwie powierzchnie boczne wewnętrzne o promieniu dużym $R = r_{r,in}$ i promieniu małym $r = r_{pb}$. Moment tarcia o powietrze powierzchni bocznych zewnętrznych wyniesie więc:

$$(29) \quad M_{f,airpb,ex} = \frac{c}{4} \left(1 - \frac{r_{pb}^2}{r_{r,ex}^2}\right) \rho_{air} \omega^2 r_{r,ex}^5$$

Liczba Reynoldsa dla tego przypadku wyniesie natomiast:

$$(30) \quad Re = \frac{r_{r,ex}^2 \omega}{\nu}$$

W przypadku powierzchni wewnętrznych moment tarcia o powietrze wyniesie:

$$(31) \quad M_{f,airpb,in} = \frac{c}{4} \left(1 - \frac{r_{pb}^2}{r_{r,in}^2}\right) \rho_{air} \omega^2 r_{r,in}^5$$

a liczba Reynoldsa dla tego przypadku wyniesie:

$$(32) \quad Re = \frac{r_{r,in}^2 \omega}{\nu}$$

Całkowity moment tarcia o powietrze pochodzący od powierzchni bocznych wynosi:

$$(33) \quad M_{f,airpb} = 2M_{f,airpb,ex} + 2M_{f,airpb,in}$$

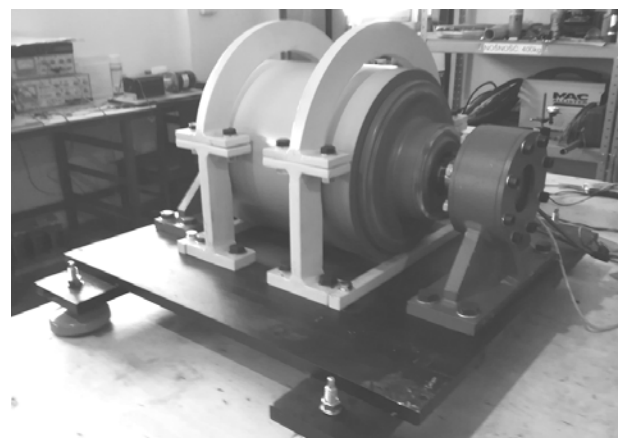
Łączny moment tarcia o powietrze pochodzący od zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni walca oraz od powierzchni bocznych wynosi więc:

$$(34) \quad M_{f,air} = M_{f,airpw} + M_{f,airpb}$$

Objekt badań

Objektem badań był wysokoobrotowy silnik PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym o kształcie wydrążonego walca stalowego. Średnice tego walca zewnętrzna i wewnętrzna wynosiły odpowiednio $d_{r,ex} = 300$ mm oraz $d_{r,in} = 200$ mm. Długość wirnika, po uwzględnieniu płyt mocujących wynosiła $l_{r,ex} = 333$ mm, a szczelina powietrzna (mechaniczna) pomiędzy wirnikiem a stojanem wynosiła $s_{a,in} = 1,2$ mm. Odległość między płytami bocznymi silnika wynosiła $l_{r,in} = 293$ mm. Otwór w płytach mocujących, w którym są umieszczone łożyska ma średnicę $d_{pb} = 100$ mm. Silnik bez dodatkowej obudowy pokazano na rys.4.

Formalnie biorąc, badany silnik nie jest silnikiem wysokoobrotowym. Ze względu jednak na dużą średnicę jego właściwości są takie same jak silnika wysokoobrotowego.



Rys.4. Badany silnik PM BLDC bez dodatkowej obudowy

Podczas pomiarów silnik był umieszczony w obudowie umożliwiającej badanie silnika przy obniżonym ciśnieniu

powietrza. Średnia odległość pomiędzy powierzchnią zewnętrzną wirnika a obudową wynosiła $g_{a_ex} \approx 60$ mm.

Moment bezwładności wirnika J_r był sumą momentu bezwładności walca wirnika J_{rw} i momentu bezwładności pokryw bocznych J_{pb} . Składowe momenty bezwładności i całkowity moment bezwładności wynosiły:

$$(35) \quad J_{rw} = \frac{\pi d_{r_in}^2 \gamma_w}{32} (d_{r_ex}^4 - d_{r_in}^4) = \frac{\pi \cdot 0,293 \cdot 7800}{32} (0,3^4 - 0,2^4) = 1,46 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

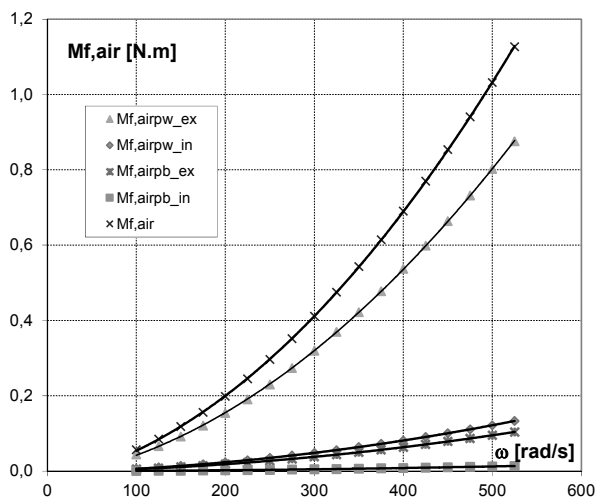
$$(36) \quad J_{pb} = \frac{\pi d_{pb}^2 \gamma_b}{32} (d_{r_ex}^4 - d_{pb}^4) = \frac{\pi \cdot 0,020 \cdot 7800}{32} (0,3^4 - 0,1^4) = 0,12 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$(37) \quad J_r = J_{rw} + 2J_{pb} = 1,46 + 2 \cdot 0,12 = 1,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

W silniku zastosowano łożyska dopuszczające pracę z prędkością obrotową do $n = 5000$ obr/min, co odpowiada prędkości kątowej $\omega = 523,6$ rad/s.

Wyznaczenie tarcia o powietrze wirnika badanego silnika

Momenty tarcia o powietrze pochodzące od zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni walca i powierzchni bocznych silnika obliczono posługując się odpowiednio zależnościami (18), (19) oraz (29) i (31). Ze względu na temperaturę występującą w trakcie badań laboratoryjnych wynoszącą $v \approx 40^\circ\text{C}$ i wartość ciśnienia atmosferycznego, w obliczeniach przyjęto gęstość powietrza równą $\rho_{air} = 1,128 \text{ kg/m}^3$ oraz współczynnik lepkości powietrza równy $\nu = 17,0 \text{ m}^2/\text{s}$.



Rys.5. Analitycznie wyznaczony moment tarcia wirnika o powietrze w funkcji prędkości kątowej: dla zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni walca wirnika; dla zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni bocznej silnika; oraz całkowity moment tarcia o powietrze

Przy obliczaniu współczynnika tarcia (12) przyjęto wartość względną szczeliny powietrznej dla powierzchni zewnętrznej równą:

$$(38) \quad g_{r_ex} = \frac{g_{a_ex}}{r_{r_in}} = \frac{0,06}{0,15} = 0,4$$

Dla powierzchni wewnętrznej przyjęto natomiast:

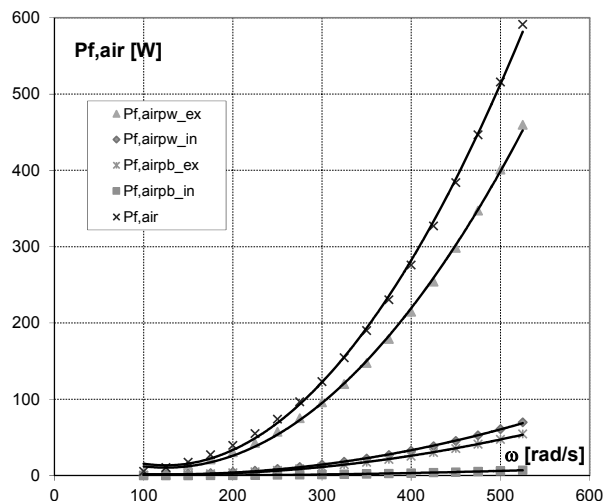
$$(39) \quad g_{r_in} = \frac{g_{a_in}}{r_{r_ex}} = \frac{0,0012}{0,0948} = 0,0127$$

Uzyskane wyniki obliczeń strat tarcia o powietrze badanego silnika przedstawiono graficznie na rys. 5.

Straty mocy można natomiast wyznaczyć korzystając z zależności:

$$(40) \quad P_{f,air} = \omega M_{f,air}$$

Korzystając z zależności (40) wyznaczono analitycznie straty tarcia o powietrze w funkcji prędkości kątowej. Odpowiednie wyniki przedstawiono na rys. 6.



Rys.6. Analitycznie wyznaczone straty tarcia wirnika o powietrze w funkcji prędkości kątowej: dla zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni walca wirnika; dla zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni bocznej; oraz sumaryczne straty tarcia o powietrze

Pomiar strat tarcia o powietrze wirnika badanego silnika

Całkowite straty w silniku PM BLDC są sumą strat elektrycznych (straty w uzwojeniach i straty w żelazie) oraz strat mechanicznych (straty w łożyskach i straty tarcia o powietrze) [8]. Straty te można je opisać zależnością:

$$(41) \quad P_{los} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mbe} + P_{f,air}$$

Ze względu na brak dokładniejszych informacji o stratach w uzwojeniach, w żelazie i w łożyskach, zdecydowano się zastosować metodę wybiegu dla silnika pracującego przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym i przy ciśnieniu obniżonym do 15% normalnego ciśnienia atmosferycznego. Obniżenie ciśnienia nie ma istotnego wpływu na straty w uzwojeniach, straty w żelazie oraz na straty w łożyskach, ma natomiast wpływ na gęstość powietrza ponieważ:

$$(42) \quad \frac{\rho_{air1}}{\rho_{air2}} = \frac{p_1}{p_2}$$

Jeśli przez P_{los1} oznaczyć straty w silniku pracującym w środowisku o normalnym ciśnieniu atmosferycznym p_1 , a przez P_{los2} oznaczyć straty w silniku pracującym w środowisku o obniżonym ciśnieniu atmosferycznym p_2 to straty w pierwszym przypadku wyniosą:

$$(43) \quad P_{los1} = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mbe} + P_{f,air1}$$

W drugim przypadku straty wyniosą natomiast:

$$\begin{aligned}
 P_{los2} &= P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mbe} + P_{f,air2} \\
 (44) \quad &= P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mbe} + \frac{P_2}{p_1} P_{f,air1}
 \end{aligned}$$

Wynika to z faktu, że:

$$(45) \quad P_{f,air2} = \frac{\rho_{air2}}{\rho_{air1}} P_{f,air1} = \frac{P_2}{p_1} P_{f,air1}$$

Porównując zależności (43) i (44) uzyska się:

$$(46) \quad P_{los1} - P_{los2} = P_{f,air1} - \frac{P_2}{p_1} P_{f,air1}$$

oraz

$$(47) \quad P_{f,air1} = \frac{P_1}{p_1 - p_2} (P_{los1} - P_{los2})$$

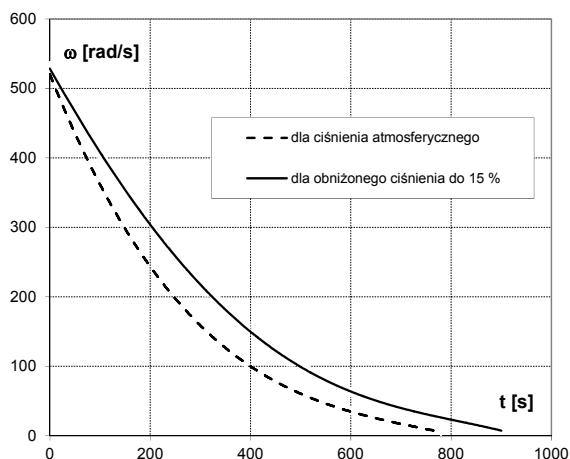
Przyporządkowując stratom P_{los1} oraz P_{los2} momenty hamujące M_{h1} oraz M_{h2} , a następnie korzystając z zależności (40) uzyska się zależność:

$$(48) \quad M_{f,air1} = \frac{P_1}{p_1 - p_2} (M_{h1} - M_{h2})$$

Występujące w zależności (48) momenty hamujące można wyznaczyć z krzywej wybiegu korzystając z zależności:

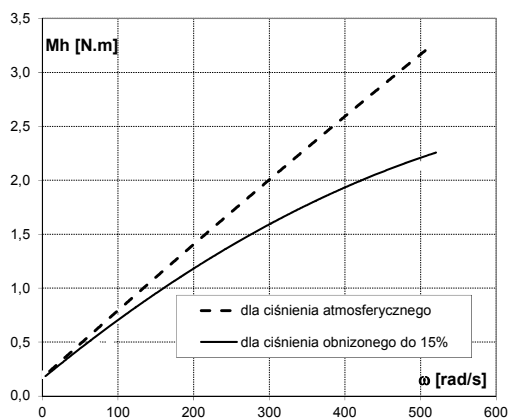
$$(49) \quad M_h = -J \frac{d\omega}{dt}$$

Na rys. 7 przedstawiono krzywe wybiegu badanego silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu i dla ciśnienia obniżonego do 15% normalnego ciśnienia atmosferycznego.



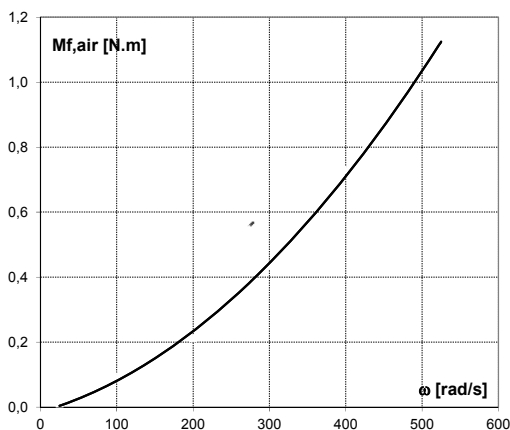
Rys.7. Krzywe wybiegu badanego silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu p_1 i dla ciśnienia obniżonego do 15% normalnego ciśnienia atmosferycznego p_2

Korzystając z zależności (49) wyznaczono zależność momentu hamującego od prędkości silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu i dla ciśnienia obniżonego do 15% normalnego ciśnienia atmosferycznego. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie na rys. 8

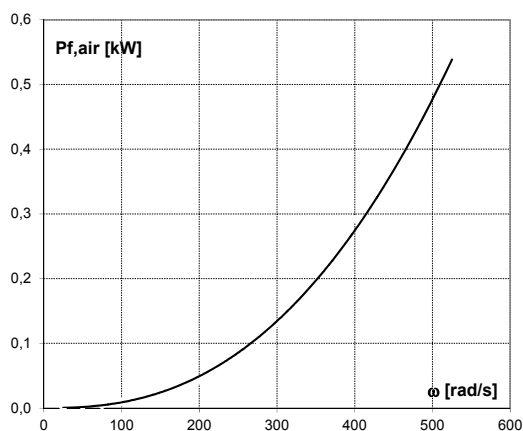


Rys.8. Moment hamujący badanego silnika w funkcji prędkości przy wybiegu dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu p_1 i dla ciśnienia obniżonego do 15% normalnego ciśnienia atmosferycznego p_2

Korzystając z zależności (48) wyznaczono zależność momentu tarcia wirnika o powietrze od prędkości silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie na rys. 9.



Rys.9. Zależność momentu tarcia wirnika o powietrze od prędkości silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu



Rys.10. Zależność strat tarcia wirnika o powietrze od prędkości silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu

Korzystając z zależności (40) wyznaczono zależność strat tarcia wirnika o powietrze od prędkości silnika dla ciśnienia w komorze równego normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie na rys. 10.

Podsumowanie. Uwagi końcowe

W pracy zaproponowano metodę obliczania strat i momentu tarcia o powietrze dla silnika PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym. Uzyskane wyniki skonfrontowano z wynikami badań laboratoryjnych. Uzyskano dużą zbieżność wyników. Najważniejsze wyniki zestawiono poniżej w punktach:

- Straty tarcia o powietrze w silniku PM BLDC z wirnikiem zewnętrznym są znacznie większe niż w silniku z wirnikiem wewnętrznym, a ich wpływ na całkowite straty silnika pojawia się przy wyższych prędkościach.
- Głównym źródłem strat tarcia o powietrze jest zewnętrzna powierzchnia walca wirnika.
- Stosowana w silnikach z wirnikiem wewnętrznym przybliżona metoda [2] obliczania strat tarcia o powietrze pomijająca wpływ parametrów powietrza i wielkość szczeliny powietrznej nie nadaje się do zastosowania w silnikach z wirnikiem zewnętrznym.
- Ze względu na duże straty tarcia o powietrze należy rozważyć stosowanie silnika w obudowie zapewniającej możliwość pracy silnika przy obniżonym ciśnieniu.

Przewiduje się kontynuację badań dla silników wirujących z prędkością około 1000 obr/ min lub większą oraz analizę relacji pomiędzy stratami tarcia o powietrze a innymi rodzajami strat mocy.

Artykuł jest finansowany z środków projektu pt.: „Opracowanie wysokoobrotowego silnika PM BLDC jako magazynu energii kinetycznej wraz z elementami infrastruktury zapewniającej doładowywanie magazynu oraz szybkie odzyskiwanie energii i przetwarzanie jej do formy i parametrów pozwalających na efektywne wykorzystywanie przez standardowe urządzenia” o numerze: POIR.01.02.00-00-0326/16.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Krykowski, dr inż. Janusz Hetmańczyk, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice. E-mail: Krzysztof.Krykowski@polsl.pl; Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl; mgr inż. Zbigniew Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: z.galuszkiewicz@el.pcz.czyst.pl, Megatech Technology Sp. z o.o. ul. Powstańców Śląskich 4, 42-660 Kalety, E-mail: z.galuszkiewicz@mttechnology.pl mgr inż. Patryk Gałuszkiewicz, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: p.galuszkiewicz@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Krykowski K., Silniki PM BLDC właściwości, sterowanie, aplikacje, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2015
- [2] Dąbrowski M., Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994
- [3] Krykowski K., Hetmańczyk J., Makiela D. i inni., Wysokoobrotowy silnik PM BLDC – rozdział w monografii pt. Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych, pod redakcją Anny Burian-Kolano, Instytut Metali Niezależnych, Gliwice 2015.
- [4] Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Gałuszkiewicz P., Calus D., High-speed permanent magnet brushless DC motors, properties and prospective applications, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95, nr 8/2019, 139-145
- [5] Mack M., Luftreibungsverluste bei elektrischen Maschinen kleiner Baugröße, Diss. TH Stuttgart, 1967
- [6] Zwyssing C., Round S.D., Kolar J. W., Analytical and experimental investigation of a low torque, ultra-high speed driver system, Industry Applications Conference, 2006, vol. 3, 1507-1513
- [7] Zhang D., Wang F., Kong X., Air friction loss calculation of high speed permanent magnet machines, in Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Systems ICEMS 2008, Wuhan, China, 2008, 320-323
- [8] Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Makiela D., Straty w wysokoobrotowych silnikach PM BLDC, X Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie elektrycznym SENE 2011- Łódź 2011