

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Katedra Maszyn Elektrycznych

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Optymalizacja silnika
reluktancyjnego przełączalnego
(SRM) z przeznaczeniem do napędu
samochodu elektrycznego

mgr inż. Michał Majchrowicz

Promotor:

dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, prof. nz. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, Politechnika Opolska

dr hab. inż. Eugeniusz Kurgan, prof. nz. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza

Kraków, 2010

1 Wprowadzenie – cel i zakres pracy

Silniki reluktancyjne przełączalne (ang. Switched Reluctance Motors, SRM) są jednymi z najprostszych konstrukcji maszyn elektrycznych. Głównymi zaletami silników SRM są relatywnie niski koszt wykonania oraz wysoka niezawodność pracy, wynikające m.in. z braku uzwojenia na wirniku oraz prostej konstrukcji stojana. Cenną zaletą jest również fakt, że straty w postaci ciepła wydzielane są głównie w stojanie, który jest stosunkowo łatwo chłodzić. Ponadto silniki SRM cechuje stosunkowo wysoki moment rozruchowy i płaska charakterystyka mechaniczna w zakresie niskich prędkości obrotowych. Zalety te czynią maszynę SRM atrakcyjną jednostką napędową dla samochodu elektrycznego. Istotnymi wadami silnika SRM są pulsacje momentu oraz hałas magnetyczny. Wynika stąd potrzeba optymalizacji konstrukcji maszyny tak, aby zminimalizować niepożądane własności.

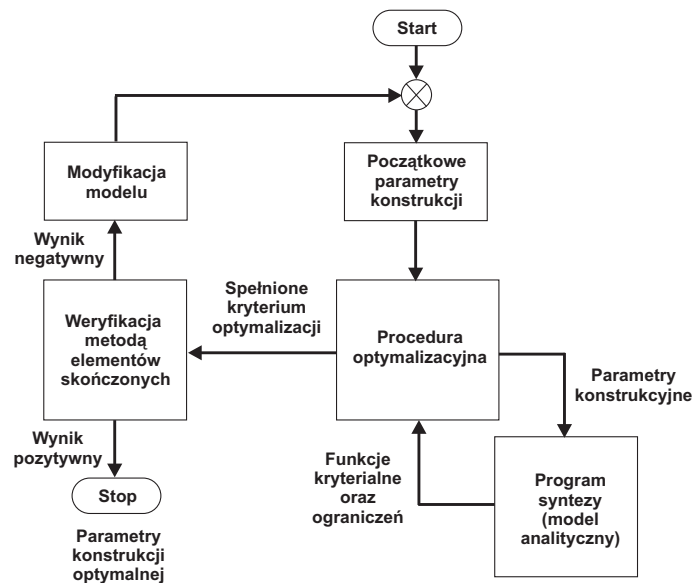
Celem niniejszej pracy jest zaproponowanie efektywnej procedury modelowania i optymalizacji własności silnika reluktancyjnego przełączalnego o ruchu obrotowym i polu promieniowym, z wirnikiem wewnętrznym, przeznaczonego do pracy jako jednostka napędowa samochodu elektrycznego, w oparciu o obliczenia analityczne.

W rozprawie przedstawiono wielopłaszczyznowy, analityczny (bazujący na metodzie sieci reluktancyjnych) sposób modelowania pracy maszyny. Model jest konkurencyjny pod względem dokładności, a znacznie bardziej efektywny w sensie czasu obliczeń względem powszechnie stosowanych dziś metod polowych. Pozwala na podstawie wymiarów geometrycznych maszyny, przy stałej prędkości obrotowej i założonym sposobie sterowania, ocenić sprawność maszyny, parametry momentu i hałas magnetyczny. Ponadto przedstawione zostaną wyniki prób poprawy własności SRM istotnych z punktu widzenia napędu samochodu elektrycznego.

Poprawność zaproponowanego modelu zweryfikowana została metodą elementów skończonych, a w pewnym sensie przez samą procedurę optymalizacyjną (zastosowano gradientową metodę sekwencyjnego programowania kwadratowego) która wymagała funkcji celu o odpowiednich własnościach, tj. wolnej od nieregularności i nieciągłości wynikających m.in. z błędów numerycznych. Ogólny schemat zastosowanego postępowania optymalizacyjnego przedstawiono na rysunku 1.

Zaproponowane w pracy procedury obliczeniowe umożliwiają przeprowadzenie stosunkowo szybkiej optymalizacji konstrukcji silnika SRM (otrzymanej wcześniej metodami przybliżonymi) pod względem wartości średniej momentu elektromagnetycznego, wahań wartości chwilowej momentu, sprawności, hałasu magnetycznego i kosztu materiałowego.

Procedury obliczeniowe zaproponowane w pracy dotyczą konstrukcji typu 6/4, choć dużą ich część można stosować przy odpowiednich warunkach dla innej liczby biegunów.



Rysunek 1: Schemat blokowy zastosowanego postępowania optymalizacyjnego

2 Teza pracy

Istnieje możliwość stworzenia analitycznego, magnetycznie nieliniowego modelu silnika SRM, który może być wykorzystany do przeprowadzenia wiarygodnej optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji silnika z uwzględnieniem algorytmu sterowania i następujących funkcji kryterialnych: parametrów momentu elektromagnetycznego, sprawności znamionowej, poziomu hałasu magnetycznego i kosztu silnika.

Teza pomocnicza:

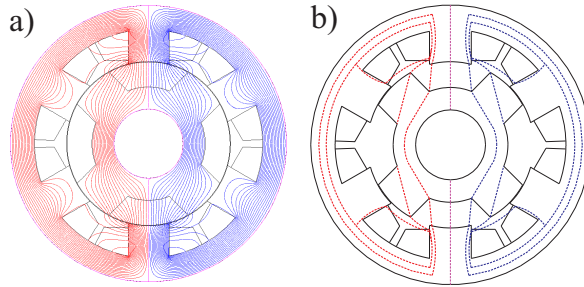
Nieliniowe równania różniczkowe zwyczajne rzędu pierwszego opisujące stany przejściowe w obwodach faz silnika, można efektywnie i znacznie dokładniej niż metodami numerycznymi rozwiązywać lokalnie, w punktach, z użyciem metod analitycznych. Metoda ta okazała się być bardzo przydatna w modelu wykorzystywanym w procedurze optymalizacyjnej.

3 Rozwiązanie problemu

3.1 Zastosowany model analityczny silnika SRM

Model analityczny zbudowany został w oparciu o metodę sieci reluktancyjnych (ang. Reluctance Network Method) zwaną czasem metodą rurek

(ang. Flux Tubes Method). Model charakteryzuje się tym, że sieć reluktancyjna złożona jest z kilku niezależnych od siebie, prostych zastępczych obwodów magnetycznych, tzw. rurek strumienia. Rozkład rurek zdefiniowany jest w taki sposób, aby odzwierciedlał przebieg linii sił pola magnetycznego w modelu polowym (rys. 2).



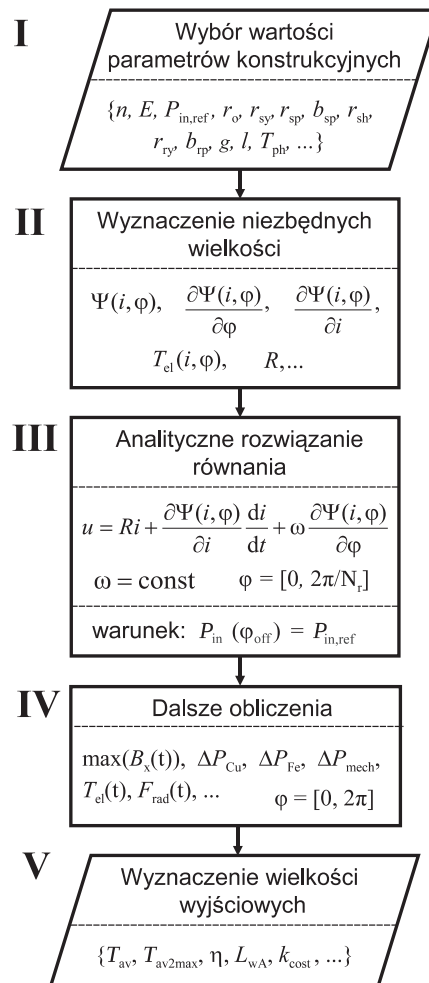
Rysunek 2: Przebieg linii sił pola magnetycznego i odpowiadający mu rozkład rurek w wybranym położeniu wirnika

Model pozwala wyznaczyć przebiegi czasowe prądu fazowego, momentu elektromagnetycznego, siły radialnej działającej na biegun stojana oraz indukcji magnetycznej w biegunie stojana, a także oszacować sprawność oraz poziom hałasu magnetycznego, dla zadanych wartości parametrów charakteryzujących konstrukcję maszyny i stan jej pracy, przy stałej prędkości obrotowej i kącie przełączenia napięcia nie większym niż $\frac{2\pi}{N_r N_{ph}}$ (gdzie N_r jest ilością biegunów wirnika, a N_{ph} – ilością faz). Model uwzględnia nieliniowość magnetyczną rdzenia, natomiast nie uwzględnia indukcyjności wzajemnej pomiędzy uzwojeniami poszczególnych faz ani zjawiska wypierania prądu. Założenie o ograniczonym kącie przełączenia napięcia wprowadzono do modelu ze względu na nieuwzględnienie w nim zjawiska indukcyjności wzajemnej, którego wpływ uwidacznia się dla kątów przełączenia większych niż $\frac{2\pi}{N_r N_{ph}}$ [1] oraz ze względu na uproszczony sposób wyznaczania strat magnetycznych [1].

Modelowanie własności silnika SRM można przedstawić w formie schematu przedstawionego na rysunku 3.

Geometrię układu z zaznaczonymi parametrami przedstawia rysunek 4, natomiast uproszczony schemat obwodu fazy – rysunek 5.

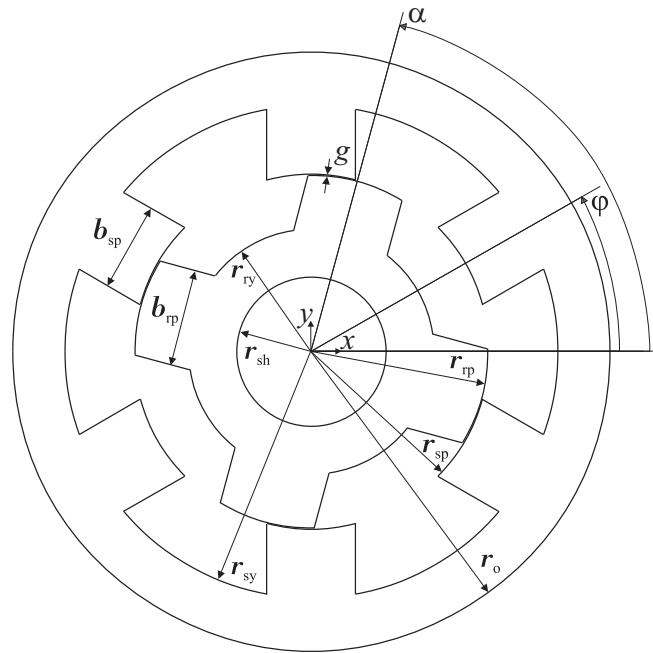
Wielkościami wprowadzanymi na początku są: prędkość obrotowa n , napięcie zasilania uzwojenia fazowego E (SEM źródła napięcia stałego), moc wejściowa odniesienia $P_{in,ref}$ (ewentualnie można zadać kąt przełączenia napięcia φ_{off} – model realizuje rzeczywiste warunki sterowania silnika SRM (1) [2]), wymiary geometryczne konstrukcji: b_{sp} , r_o , r_{sy} , r_{sp} , b_{rp} , r_{sh} , r_{ry} , g , l (długość czynna rdzenia) (rysunek 4), ilość zwojów w uzwojeniu fazy T_{ph} , średnica przewodu d_{1T} w uzwojeniu oraz krzywa magnesowania rdzenia $B = f_B(H)$. Ponadto należy podać przewidywane wartości przepływu Θ



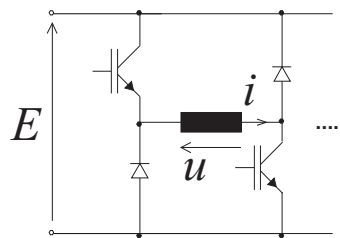
Rysunek 3: Schemat blokowy magnetycznie nieliniowego, analitycznego modelu silnika SRM wykorzystanego w postępowaniu optymalizacyjnym

w uzwojeniu fazy (wartości graniczne), a także przewidywaną temperaturę pracy uzwojenia oraz wartości współczynników charakteryzujących materiały i stałych fizycznych.

W pierwszej kolejności wyznaczane są funkcja indukcyjności L uzwojenia fazowego w zależności od kąta położenia wirnika i prądu fazowego (rys. 6) oraz jej pochodne względem kąta położenia wirnika i prądu fazowego. Funkcja indukcyjności uzwojenia L względem kąta położenia wirnika wyznaczana jest na podstawie znajomości parametrów charakteryzujących konstrukcję maszyny. Indukcyjność uzwojenia jest sumą indukcyjności poszczególnych rurek. Indukcyjność pojedynczej rurki wyznaczana jest w oparciu o wielkości geometryczne charakteryzujące jej przebieg oraz rozwiązanie równania spadków napięcia magnetycznego. Szczegółowe informacje na temat sposo-



Rysunek 4: Geometria układu



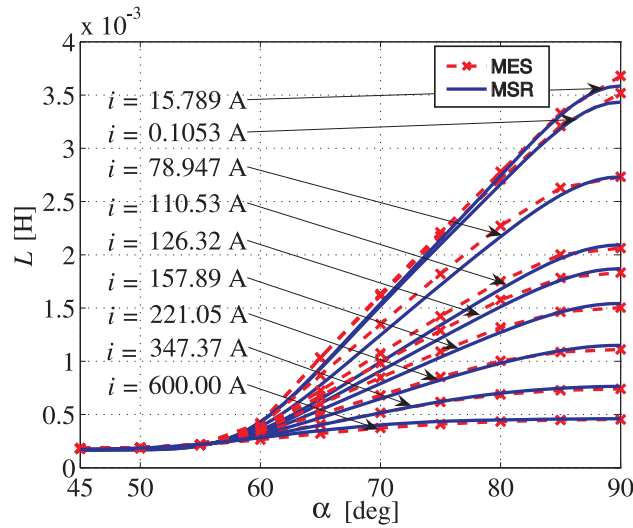
Rysunek 5: Uproszczony schemat obwodu jednej fazy przekształtnika

bu wyznaczania indukcyjności uzwojenia opublikowano w pracach [3], [4]. Następnie funkcja indukcyjności wraz z pochodnymi przeliczane są na funkcję $\Psi(i, \varphi)$ i pochodne $\frac{\partial \Psi(i, \varphi)}{\partial i}$, $\frac{\partial \Psi(i, \varphi)}{\partial \varphi}$ strumienia skojarzonego (blok II na rysunku 3; kolejność taka podyktowana jest wcześniejszymi badaniami autora opartymi na funkcji indukcyjności jako wielkości charakteryzującej własności dynamiczne maszyny). W następnym kroku wyznaczana jest funkcja koenergii magnetycznej oraz momentu elektromagnetycznego (statycznego) $T_{el}(i, \varphi)$ (rys. 7). Wybrane aspekty wyznaczania momentu elektromagnetycznego silnika SRM w środowisku FLUX 2D można znaleźć w pracy [5], natomiast wpływ wybranych parametrów geometrycznych na przebiegi momentu statycznego a także na własności dynamiczne można znaleźć w pracy [6]. Następnie wyznaczana jest wartość rezystancji uzwojenia R [7].

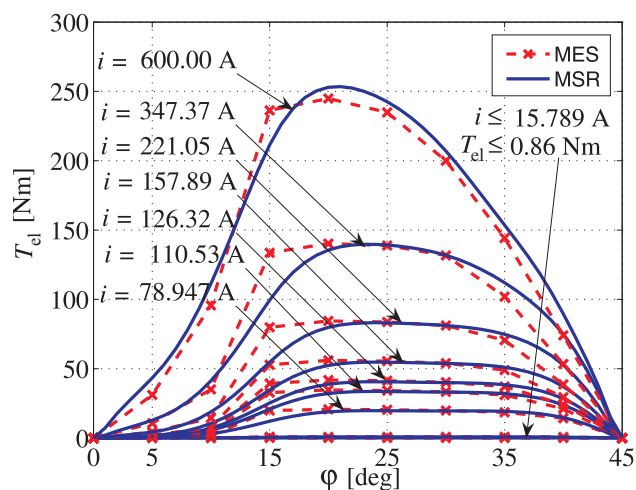
Na podstawie znajomości parametrów charakteryzujących uzwojenie, sy-

mulowana jest praca silnika przy zadanej prędkości kątowej ω i warunkach początkowych $i(t=0) = 0$, $u(t=0) = E$ oraz $\varphi(t=0) = 0$, poprzez uproszczone analityczne rozwiązanie równania różniczkowego opisującego obwód jednej fazy (blok III na rysunku 3). Szczegółowe informacje na temat rozwiązania równania różniczkowego opisującego obwód fazy zamieszczono w pracy [1]. Na podstawie otrzymanego przebiegu prądu $i(t)$ (rys. 8) w uzwojeniu maszyny można w przybliżeniu wyznaczyć przebieg strumienia magnetycznego w biegunie stojana, a na jego podstawie - maksymalne wartości przebiegów indukcji magnetycznej $\max(B_x(t))$ (blok IV na rysunku 3 oraz rysunek 9) w kilku charakterystycznych punktach „x” obwodu magnetycznego. Na podstawie przebiegu prądu $i(t)$ można wyznaczyć przebieg momentu elektromagnetycznego $T_{el}(t)$ silnika, przebieg siły radialnej $F_{rad}(t)$ działającej na naprzeciwległe bieguny stojana (niezbędnej do wyznaczenia poziomu hałasu magnetycznego, sposób jej wyznaczania opisano w pozycji [1]) oraz straty w uzwojeniach ΔP_{Cu} , a na podstawie wartości maksymalnych indukcji magnetycznej - oszacować straty magnetyczne w rdzeniu ΔP_{Fe} (blok IV na rysunku 3).

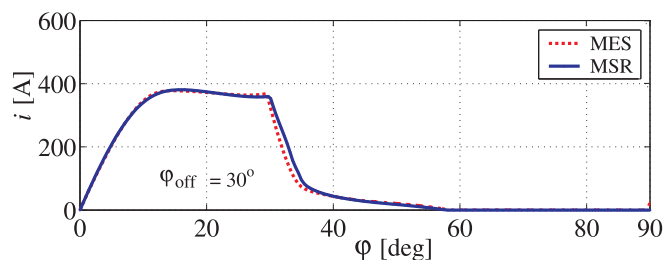
$$u = \begin{cases} E & \text{dla } 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{off}}, \quad \text{gdy } i \geq 0 \\ -E & \text{dla } \varphi_{\text{off}} < \varphi \leq \frac{2\pi}{N_r}, \quad \text{gdy } i > 0 \\ 0 & \text{dla } \varphi_{\text{off}} < \varphi \leq \frac{2\pi}{N_r}, \quad \text{gdy } i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$



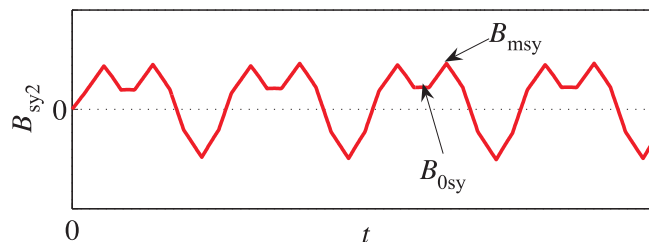
Rysunek 6: Przebieg kątowy indukcyjności fazy dla wybranych wartości prądu fazowego otrzymany metodą elementów skończonych (MES) oraz metodą sieci reluktancyjnych (MSR) dla konstrukcji wyjściowej



Rysunek 7: Przebieg kątowy momentu statycznego przy zasilaniu jednej fazy dla wybranych wartości prądu fazowego, otrzymany metodą elementów skończonych (MES) oraz metodą sieci reluktancyjnych (MSR) dla konstrukcji wyjściowej



Rysunek 8: Przebiegi kątowe prądu fazowego i otrzymane przy pomocy modelu opartego na metodzie sieci reluktancyjnych (MSR) oraz modelu opartego na metodzie elementów skończonych (MES)



Rysunek 9: Charakterystyczne wartości przebiegu czasowego indukcji magnetycznej w jednym z elementów jarzma stojana (wyniki obliczeń MES dla konstrukcji wyjściowej przy $\omega = \text{const}$)

3.2 Kryteria oceny konstrukcji silnika SRM

W następnej kolejności wyznaczane są kryteria pośrednie, tj. wielkości użyte później w optymalizacji jako elementy funkcji kryterialnych lub elementy zbioru ograniczeń, tj.: wartość średnia momentu (2), współczynnik wahań momentu (3) (w badaniach wstępnych był sformułowany dla funkcji momentu statycznego [6]), sprawność maszyny (4), masa (związana z kosztem materiałowym) oraz poziom generowanego hałasu.

$$T_{av} = \frac{N_{ph}}{\frac{2\pi}{N_r}} \int_0^{\frac{2\pi}{N_r}} T_{el}(\varphi) d\varphi \quad (2)$$

$$T_{av2max} = \frac{T_{av}}{\max_{\varphi \in [0, \frac{2\pi}{N_r}]} [T_{el}(\varphi)]} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - \Delta P_{Cu} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mech}}{P_{in}} \quad (4)$$

gdzie:

P_{in} – moc wejściowa [2],

ΔP_{Cu} – moc strat elektrycznych [2],

ΔP_{Fe} – moc strat magnetycznych [2], [7], [1]

ΔP_{mech} – moc strat mechanicznych [2].

Jedną z największych wad silników reluktancyjnych przełączalnych jest stosunkowo wysoki poziom generowanego hałasu magnetycznego. Własność ta w dużym stopniu stanowi o mniejszej konkurencyjności silników SRM względem innych maszyn np. indukcyjnych, w szczególności w zastosowaniach do napędu pojazdu samochodowego i nie może być pominięta w postępowaniu optymalizacyjnym. Hałas można skutecznie zredukować już na etapie projektowania maszyny reluktancyjnej przełączalnej - poprzez odpowiedni dobór wymiarów konstrukcyjnych. Obliczenia dotyczące hałasu magnetycznego oparte są na uproszczonym modelu analitycznym wykorzystującym przebieg czasowy siły radialnej $F_{rad}(t)$ działającej na biegun stojana (model, ze względu na swój uproszczony charakter nie uwzględnia składowej tangencjalnej siły), analizę modalną stojana, analizę częstotliwościową przebiegu siły radialnej, amplitudę drgań powierzchni stojana, moc emitowanego dźwięku i poziom hałasu magnetycznego (rozumiany jako poziom mocy dźwięku skorygowany krzywą korekcyjną typu „A”). Szczegółowe informacje na temat wyznaczania poziomu hałasu magnetycznego można znaleźć w pozycji [1].

3.3 Optymalizacja konstrukcji silnika SRM

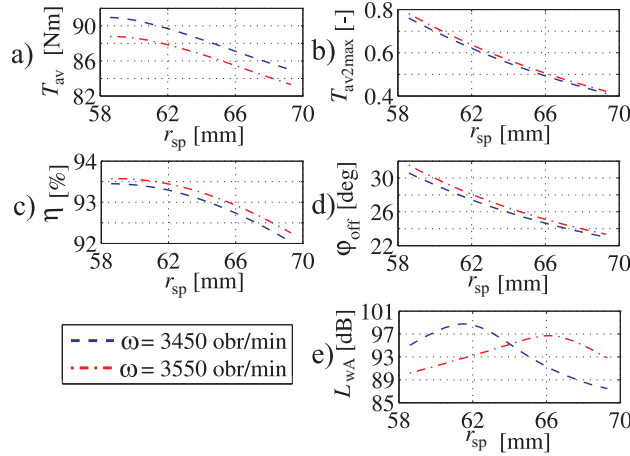
Efektywność obliczeń optymalizacyjnych w istotny sposób zależy od sposobu sformułowania zadania optymalizacji. W celu odpowiedniego sformułowania problemu optymalizacji – wyboru zmiennych optymalizacji, obszaru dopuszczalnego oraz funkcji celu – przeprowadzono analizę wrażliwości poszczególnych kryteriów oceny silnika SRM.

Dla każdego kryterium wyznaczono wartości pochodnych cząstkowych dla konstrukcji wyjściowej. Pochodne wyznaczano zgodnie z wzorem:

$$\frac{\partial f_j}{\partial x_i} = \frac{f_j(x_{i0} + \Delta x_i) - f_j(x_{i0} - \Delta x_i)}{2\Delta x_i} \quad (5)$$

gdzie f_j jest j -tym kryterium, x_i jest i -tą zmienną, a x_{i0} jest wartością wyjściową i -tej zmiennej.

Wyniki analizy wpływu długości promienia bieguna stojana r_{sp} (przy zachowanej stałej szerokości szczeliny powietrznej r_{sp}) dla wybranych wartości prędkości obrotowej n , przy stałej mocy wejściowej $P_{in} = 35$ kW przedstawia rysunek 10.



Rysunek 10: Wpływ długości promienia bieguna stojana r_{sp} dla wybranych wartości prędkości obrotowej n , przy stałej mocy wejściowej $P_{in} = 35$ kW

Na podstawie otrzymanych wyników można sformułować następujące prawidłowości:

1. Największy wpływ na wartości kryteriów takich jak sprawność, moment średni oraz współczynnik pulsacji momentu mają szerokości biegunów i związany z nimi promień bieguna wirnika (położenie szczeliny powietrznej), a także szerokość szczeliny powietrznej i średnica drutu nawojowego.

2. Największy wpływ na wartość hałasu magnetycznego mają szerokość jarzma stojana oraz średnica drutu nawojowego (masa uzwojenia), a ze

względu na własności funkcji hałasu (wielość ekstremów wynikająca ze zjawiska rezonansu) warto rozważyć posłużenie się w optymalizacji kryterium zastępczym – sumą ważoną odwrotności szerokości jarzma stojana i średnicy drutu nawojowego – jako substytutem poziomu generowanego hałasu magnetycznego.

3. Na koszt materiałowy maszyny największy wpływ mają średnica zewnętrzna stojana oraz średnica drutu nawojowego (masa uzwojenia).

Po przeprowadzeniu analizy wrażliwości przystąpiono do obliczeń optymalizacyjnych.

Zmiennymi optymalizacji było 11 parametrów konstrukcyjnych, które są współrzędnymi wektora \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = [b_{sp}, r_o, r_{sy}, r_{sp}, b_{rp}, r_{sh}, r_{ry}, l, g, T_{ph}, d_{1T}] \quad (6)$$

Obszar dopuszczalny X zdefiniowany był przy pomocy trzydziestu trzech liniowych i dwunastu nieliniowych ograniczeń nierównościowych, oraz jednego nieliniowego ograniczenia równościowego. Ograniczenia dotyczyły m.in. parametrów pracy, tj. wartości mocy wejściowej $P_{in} = 35$ kW oraz kąta przełączenia napięcia $\varphi_{off} \leq 30^\circ$ które były tak sformułowane, aby uniknąć nierealistycznych rozwiązań, a otrzymane rozwiązanie spełniało wymagania projektowe.

Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono w kilku wariantach. W pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia dla problemu P_I [1] ([8] – dla modelu analitycznego liniowego), gdzie chodziło o minimalizację pulsacji momentu przy nie pogorszonych wartościach części pozostałych kryteriów.

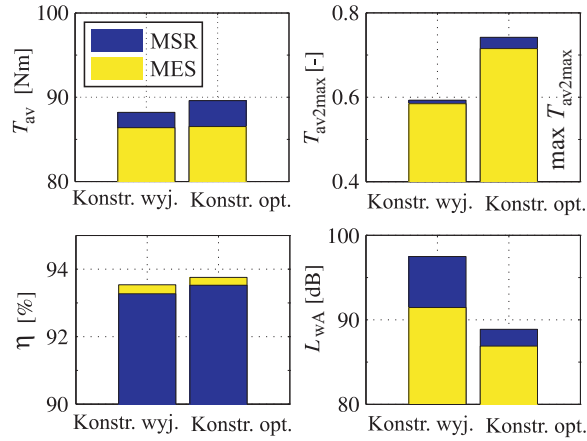
$$\text{Problem } P_I : \min_{\mathbf{x} \in X} \left(2 - \frac{T_{av2max}}{T_{av2max0}} \right) \mid T_{av} \geq T_{av0}, \quad k_{cost} \leq k_{cost0} \quad (7)$$

Wartości kryteriów dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej przedstawia rysunek 11.

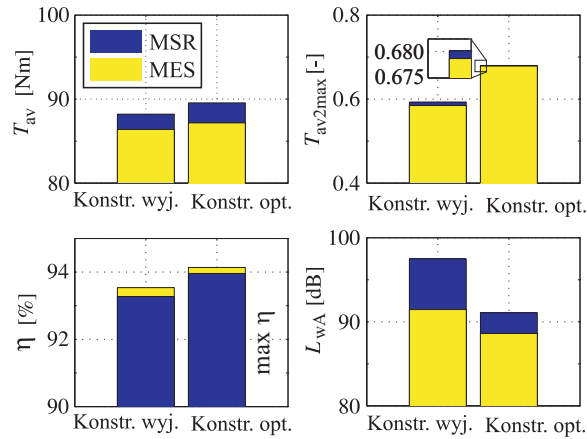
Następnie przeprowadzono obliczenia dla problemu P_{II} [1], gdzie optymalizowana była sprawność maszyny tak, aby nie pogorszyć wartości pozostałych kryteriów.

Problem P_{II} :

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \left(2 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \mid T_{av2max} \geq T_{av2max0}, \quad T_{av} \geq T_{av0}, \quad k_{cost} \leq k_{cost0}, \quad L_{wA} \leq L_{wA0} \quad (8)$$



Rysunek 11: Wartości kryteriów oceny maszyny otrzymane przy użyciu modelu analitycznego (MSR) i metody elementów skończonych (MES) dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej będącej wynikiem rozwiązania problemu P_I [1]



Rysunek 12: Wartości kryteriów oceny maszyny otrzymane przy użyciu modelu analitycznego (MSR) i metody elementów skończonych (MES) dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej będącej wynikiem rozwiązania problemu P_{II} [1]

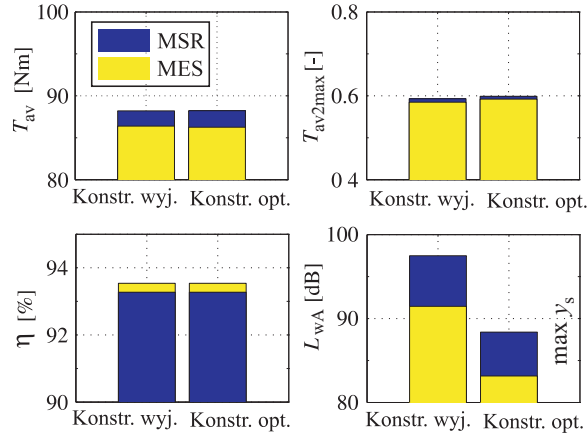
Wartości kryteriów dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej przedstawia rysunek 12.

Następnie przeprowadzono obliczenia dla problemów P_{III} i P_{IV}, mające na celu sprawdzić, czy możliwe jest zastąpienie problemu minimalizacji hałasu problemem prostszym – maksymalizacji jarzma stojana. W pierwszym przypadku hałas magnetyczny minimalizowany był pośrednio, poprzez maksymalizowanie szerokości jarzma y_s stojana (9), a w drugim minimalizowano wprost poziom hałasu magnetycznego L_{wA} (10).

$$\text{Problem P}_{III} : \min_{\mathbf{x} \in X} \left(2 - \frac{y_s}{y_{s0}} \right) \left| T_{av2max} \geq T_{av2max0}, T_{av} \geq T_{av0}, \eta \geq \eta_0 \right. \quad (9)$$

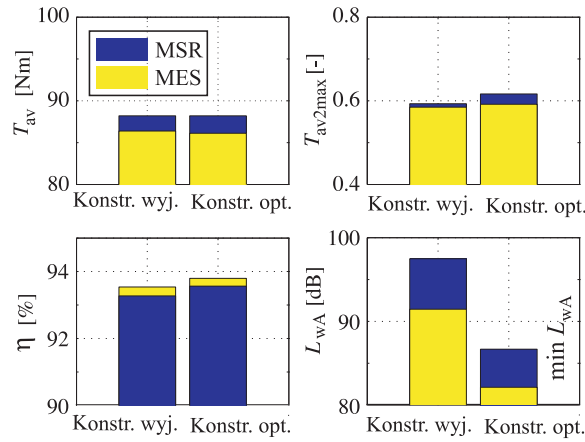
$$\text{Problem P}_{IV} : \min_{\mathbf{x} \in X} \left(\frac{L_{wA}}{L_{wA0}} \right) \left| T_{av2max} \geq T_{av2max0}, T_{av} \geq T_{av0}, \eta \geq \eta_0 \right. \quad (10)$$

Wartości kryteriów dla konstrukcji wyjściowej i optymalnych przedstawiają rysunki 13 i 14.



Rysunek 13: Wartości kryteriów oceny maszyny otrzymane przy użyciu modelu analitycznego (MSR) i metody elementów skończonych (MES) dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej będącej wynikiem rozwiązania problemu P_{III}

Podjęto próbę poszukiwania konstrukcji charakteryzującej się minimalną wartością hałasu magnetycznego przy możliwie wysokiej wartości średniej



Rysunek 14: Wartości kryteriów oceny maszyny otrzymane przy użyciu modelu analitycznego (MSR) i metody elementów skończonych (MES) dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej będącej wynikiem rozwiązania problemu P_{IV}

momentu – problem P_V . Rysunek 15 przedstawia rozwiązanie problemu P_V w przestrzeni celu w postaci zbioru punktów kompromisowych, natomiast na rysunku 16 przedstawiono wartości kryteriów dla konstrukcji wyjściowej i optymalnej – wybranej ze zbioru punktów kompromisowych, stanowiącej rozwiązanie problemu P'_V .

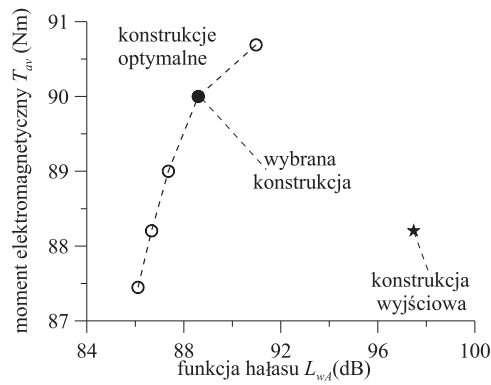
$$\text{Problem } P_V : \quad \min(L_{wA}), \max(T_{av}) \quad \left| \mathbf{x} \in X \right. \quad (11)$$

$$\text{Problem } P'_V : \quad \min(L_{wA}) \quad \left| T_{av} \geq 90, \mathbf{x} \in X \right. \quad (12)$$

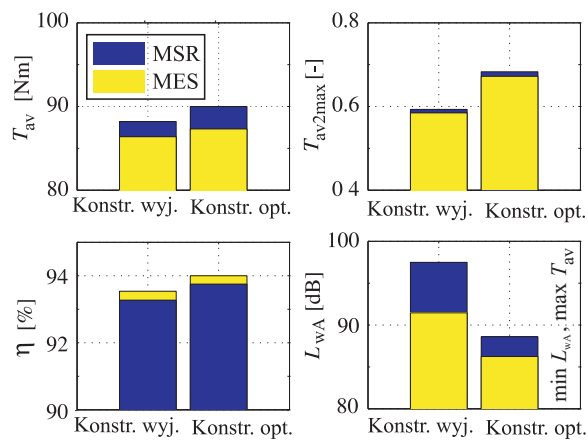
Rozwiązania problemów $P_I - P_{IV}$ przedstawiono na rysunku 17.

Otrzymane wyniki wskazują na wyraźną zgodność nie tylko jakościową ale i ilościową (z wyjątkiem kryterium hałasu) pomiędzy modelem analitycznym i metodą elementów skończonych co świadczy o poprawności modelu analitycznego. Niezgodności ilościowe w przypadku hałasu wynikają z większych wartości siły radialnej w modelu analitycznym.

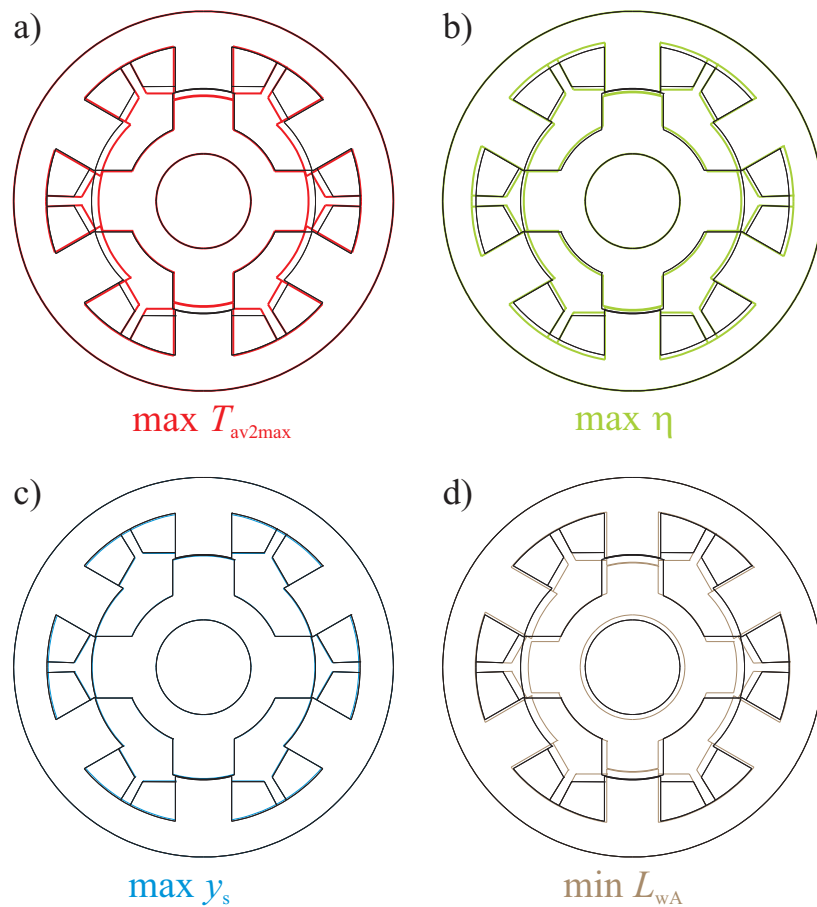
Wśród otrzymanych wyników szczególnie należy zwrócić uwagę na fakt, że przy poszukiwaniu maksimum T_{av2max} konstrukcja optymalna osiągnęła równą szerokość biegunów stojana i wirnika. Ponadto w dwóch problemach P_I i P_{II} nastąpiło skrócenie długości rdzenia, zmniejszenie szerokości jarzma stojana, zwiększenie średnicy drutu nawojowego i zmniejszenie promienia bieguna wirnika, natomiast ze względu na zmienne takie jak ilość zwojów, czy szerokość bieguna stojana, kryteria optymalizacji okazały się niezgodne.



Rysunek 15: Rozwiązanie problemu P_V w przestrzeni celu – zbiór punktów kompromisowych



Rysunek 16: Wartości kryteriów oceny maszyny otrzymane przy użyciu modelu analitycznego (MSR) i metody elementów skończonych (MES) dla konstrukcji wyjściowej oraz najlepszej spośród zbioru punktów kompromisowych, stanowiącej rozwiązanie problemu P'_V



Rysunek 17: Porównanie geometrii konstrukcji wyjściowej i optymalnych będących rozwiązaniami problemów P_I-a) – P_{IV}-d)

Wnioski takie nie mają jednak charakteru ogólnego, ze względu na różnice pomiędzy zbiorami ograniczeń dla obu problemów. Ponadto, w problemie P_{II} jednym z aktywnych ograniczeń było ograniczenie dotyczące kosztu materiałowego, co pozwala przypuszczać, że kryteria kosztu materiałowego i sprawności silnika SRM nie są zgodne, podobnie jak to ma miejsce w silnikach indukcyjnych [9].

Ponadto, interesująca jest konstrukcja będąca wynikiem rozwiązania problemu P_{III} – przy minimalnie zmienionych wymiarach otrzymano konstrukcję lżejszą, o mniejszych pulsacjach momentu, mniejszym hałasie, podobnej sprawności i podobnym momencie średnim.

Wyniki optymalizacji, szczególnie w przypadku problemu P_V, wskazują dodatkowo na zgodność (w sensie pożądanego kierunku poprawy danej własności silnika) kryteriów hałasu, sprawności i współczynnika pulsacji momentu w okolicach punktu startowego.

4 Podsumowanie

Zastosowanie metod optymalizacji gradientowej w połączeniu z rozbudowanymi modelami analitycznymi umożliwia wykonanie szerokiej, choć przybliżonej analizy własności projektowanego silnika, w znacznie krótszym czasie niż wykonanie takiej analizy bazując na modelu polowym. Pozwala to lepiej wybrać rozwiązanie optymalne dla danego zastosowania.

W pracy zaprezentowano efektywny sposób modelowania silnika SRM, zawierający m.in. sposób wyznaczania indukcyjności uzwojenia, analityczny sposób symulacji pracy ze stałą prędkością uwzględniający nieliniowość magnetyczną, analityczny sposób wyznaczania sprawności maszyny oraz hałasu magnetycznego. O skuteczności zaprezentowanego modelu świadczą otrzymane wyniki optymalizacji.

W świetle przeprowadzonej analizy dostępnej literatury fachowej oryginalnymi elementami rozprawy wydają się być:

- zaproponowany sposób symulacji maszyny wykorzystujący analityczne rozwiązanie nieliniowego równania różniczkowego
- zaproponowany model strat magnetycznych
- zaproponowany sposób wyznaczania siły radialnej w oparciu o funkcję indukcyjności uzwojenia
- próby poszukiwania kryteriów zastępczych
- szeroka analiza wrażliwości najważniejszych kryteriów oceny silnika SRM na większość istotnych parametrów konstrukcyjnych (parametry geometryczne oraz parametry uzwojenia z uwzględnieniem algorytmu sterowania)
- kilka przypadków optymalizacji maszyny SRM z uwzględnieniem większej niż spotykana w literaturze ilością tak kryteriów jak i zmiennych, w tym przykład rozwiązania problemu bikryterialnego.

Istotnym wnioskiem wydaje się być hipoteza, że kryterium hałasu magnetycznego można w sposób efektywny uwzględnić w postaci kryterium zastępczego którym jest szerokości jarzma stojana. Spostrzeżenie to powinno być weryfikowane w dalszych pracach.

Ważnymi wnioskami o znaczeniu praktycznym, chociaż o ograniczonym stopniu ogólności, są wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych obliczeń wrażliwości. Mogą być one wykorzystane m.in. na etapie definicji problemu optymalizacji, przy wyborze wektora zmiennych optymalizacji.

W trakcie realizacji prac dokonano spostrzeżenia, że niezależnie od kryterium optymalizacji (spośród hałasu, sprawności i współczynnika pulsacji momentu) pozostałe kryteria zwykle ulegały poprawie. Gdyby ta własność

okazała się prawdziwa dla innych konstrukcji, zamiast rozwiązywania złożonego problemu optymalizacji wielokryterialnej, można by poprzestać na optymalizacji skalarnej.

Uzyskane wyniki optymalizacji uzasadniają celowość wykonanych prac. Uzyskanie otrzymanych wyników z wykorzystaniem metod polowych byłoby bardzo czasochłonne. Czas obliczeń jednego przypadku optymalizacji w środowisku MATLAB na komputerze PC z procesorem Pentium 3GHz wynosił kilka godzin i jest znacznie krótszy od przewidywanych czasów obliczeń wykorzystaniem modeli polowych. Należy zaznaczyć, że wprowadzenie modelu nieliniowego znacznie wydłuża czas obliczeń w stosunku do modelu magnetycznie liniowego, nawet o rząd wielkości.

Weryfikacja rozwiązań przy pomocy modeli polowych potwierdziła wiarygodność wyników optymalizacji we wszystkich przypadkach. Uzyskano zgodność jakościową, a różnice ilościowe są do przyjęcia w rozwiązaniach praktycznych. Przyjmując, że wyniki obliczeń polowych są wiarygodnym źródłem informacji o własnościach silnika, tezę pracy można uznać za wykazaną.

Poniżej wymieniono publikacje doktoranta związane z tematyką rozprawy.

Literatura

- [1] Majchrowicz M., Jazdzyński W. Selected problems of optimization of a switched reluctance motor for an electric vehicle using analytical calculations. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada, Spain, 23-25 March 2010. Paper ID 483. [cytowanie na str. 4, 7, 9, 11, 12]
- [2] Jazdzyński W., Majchrowicz M. An approach to find an optimum designed SRM for electric vehicle drive. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008. Paper ID 1391. [cytowanie na str. 4, 9]
- [3] Majchrowicz M. Model analityczny silnika przełączalnego reluktancyjnego (SRM) na potrzeby optymalizacji jego konstrukcji. *Elektrotechnika i Elektronika*, 26(1-2):46–53, 2007. [cytowanie na str. 6]
- [4] Jazdzyński W., Majchrowicz M. Wybrane aspekty modelowania silnika reluktancyjnego przełączalnego metodą sieci reluktancyjnych. *Podstawowe Problemy Energoelektroniki Elektromechaniki i Mechatroniki – XII Sympozjum PPEE'2007*, strony 123–128, Wisła, 9–12 grudnia 2007. [cytowanie na str. 6]
- [5] Jazdzyński W., Majchrowicz M., Bajek M., Bąk T. Modelowanie i przykłady analizy własności silnika asynchronicznego synchronizowanego (LSPMSM) oraz reluktancyjnego (SRM) z wykorzystaniem programu FLUX2D. *Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines, SME'05*, strony 136–141, Jarnołtówek, 14-17 czerwca 2005. [cytowanie na str. 6]

- [6] Majchrowicz M. Parametryczna analiza własności statycznych i dynamicznych silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM) z wykorzystaniem modeli polowych i obwodowych. Proceedings of XLII International Symposium on Electrical Machines, strony 83–86, Kraków, 3-6 lipca 2006. [cytowanie na str. 6, 9]
- [7] Majchrowicz M., Jażdżyński W. Wybrane zagadnienia wyznaczania strat w silniku reluktancyjnym przełączalnym. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 239:5–16, 2008. Artykuł zaprezentowany na Warsztatach Doktoranckich WD'2008, Kazimierz Dolny, 7–9 września 2008. [cytowanie na str. 6, 9]
- [8] Majchrowicz M., Jażdżyński W. Wybrane aspekty optymalizacji silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM) przeznaczonego do napędu samochodu elektrycznego. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, (Nr 84/2009):147–150, Branżowy Ośrodek Badawczo–Rozwojowy Maszyn Elektrycznych. Artykuł zaprezentowany na XLV Międzynarodowym Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'2009, Rzeszów - Krasieczyn, 23-26 czerwca 2009. [cytowanie na str. 11]
- [9] Jażdżyński W., Majchrowicz M., Bajek M. Searching for optimum designed electric motors, energy-efficient and for electric car drive. Kierunki działalności i współpraca naukowa Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, strony 191–192, Kraków, 28-29 maja 2009. Akademia Górniczo-Hutnicza. Materiały konferencji zorganizowanej z okazji Jubileuszu 90-lecia AGH. [cytowanie na str. 16]