WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI i INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ im. ST. STASZICA W KRAKOWIE

KATEDRA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Autoreferat rozprawy doktorskiej

ANALIZA WŁASNOŚCI I SYNTEZA PROJEKTOWA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO ROZRUCHU BEZPOŚREDNIEGO (LSPMSM) Z WYKORZYSTANIEM METOD POLOWYCH I OPTYMALIZACJI

mgr inż. Marcin Bajek

Promotor: Dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, prof. nadzw. AGH
Dyscyplina: Elektrotechnika

luty 2013

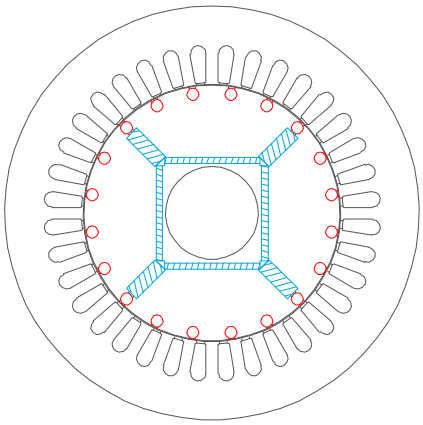
Streszczenie: Rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia procesu projektowania i analizy własności silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (z ang. *LSPMSM*), charakteryzującego się zdolnością samorozruchu oraz pracy z prędkością ustaloną synchroniczną. Celem rozprawy było stworzenie narzędzia do analizy i projektowania LSPMSM w postaci modelu analitycznego w środowisku Matlab, który można zaimplementować w automatycznej procedurze optymalizacyjnej. Model ten uwzględnia parametry geometrii, uzwojenia stojana i właściwości użytych materiałów. Zaprezentowano metodę określania ważniejszych parametrów modelu wykorzystującą zastępczą przenikalność magnetyczną obwodu magnetycznego modelu, prowadzącą do przybliżenia nieliniowego charakteru magnesowania ferromagnetycznych części rzeczywistej maszyny, przy pomocy jego aproksymacji odpowiednio skonstruowanym modelem magnetycznie liniowym. Obliczenia wykonywane przy pomocy przedstawionego modelu analitycznego zostały zweryfikowane przy pomocy obliczeń polowych w programie Flux 2D, wykorzystującym metodę elementów skończonych (z ang. *FEM*). Weryfikacja w początkowych etapach tworzenia modelu pozwoliła także na jego udokładnienie. Opracowane narzędzie w postaci modelu analitycznego posłużyło do działań optymalizacyjnych ukierunkowanych głównie na takie kryteria, jak zwiększenie sprawności maszyny (optymalizacja skalarna) oraz zwiększenie sprawności przy zachowaniu jak najniższych kosztów wytworzenia maszyny (optymalizacja bikryterialna). Jak wykazano w rozprawie, stworzony model analityczny pozwala na dobre odwzorowanie własności maszyny (m.in. przebiegu składowej normalnej indukcji w szczelinie, strat w żelazie oraz generowanego hałasu), a w zastosowaniu w procedurze optymalizacyjnej umożliwia zaprojektowanie maszyny o sprawności spełniającej najwyższe normatywne i nieformalne klasy sprawności. Cel ten osiągnięto i zweryfikowano doświadczalnie na wykonanym prototypie silnika LSPMSM.

1. Wstęp

W dobie poszukiwań oszczędności energii elektrycznej zainteresowanie maszynami o wysokiej sprawności rośnie. Do tej grupy maszyn zalicza się silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bepzośrednim (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*, LSPMSM), w którym poza dużą sprawnością, można uzyskać współczynnik mocy bliski jedności. Maszyny te mają stosunkowo prostą konstrukcję (nie posiadają szczotek ani pierścieni ślizgowych, które stwarzają pewne problemy eksploatacyjne). Silnik LSPMSM poza wymienionymi zaletami nie wymusza na użytkowniku stosowania dodatkowych układów rozruchowych, jako że posiada klatkę rozruchową, umożliwiającą rozruch przez bezpośrednie podłączenie do sieci elektrycznej. Do wad silnika LSPMSM należy zaliczyć jego stosunkowo duży koszt, wynikający ze stosowania drogich materiałów magnetycznych. Dążenie do zwiększania sprawności maszyn powoduje jednak, że zainteresowanie LSPMSM rośnie.

Opisywaną rozprawę doktorską autor poświęcił zagadnieniu projektowania LSPMSM, z wykorzystaniem dwóch narzędzi - modeli polowych oraz obwodowych. Modele polowe wykorzystywane w analizie były zbudowane w oprogramowaniu Flux 2D, wykorzystującym metodę elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*, FEM). Model analityczny wykorzystywał środowisko Matlab/Simulink.

Opracowany model analityczny posłużył do działań ukierunkowanych na optymalizację konstrukcji pod kątem takich wielkości jak sprawność oraz koszt materiałów aktywnych.



Rys. 1 Topologia silnika LSPMSM przyjęta do analizy w rozprawie.

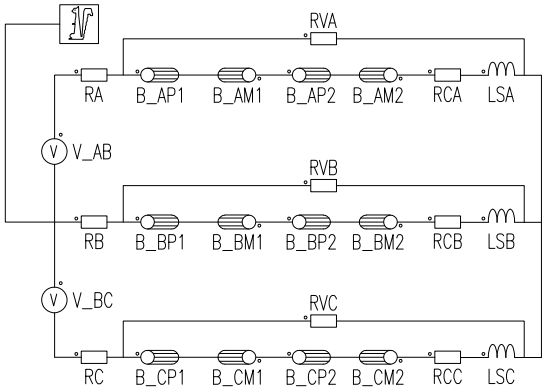
W rozprawie przyjęto do analizy topologię wirnika charakteryzującą się układem magnesów trwałych w kształcie litery "U" (oznaczenie autora), jak na rysunku powyżej. Wymiary i moc maszyny były wzorowane na rzeczywistym silniku indukcyjnym typu Sg90L-4. Modyfikacja do konstrukcji LSPMSM obejmowała zastosowanie klatki w postaci prętów miedzianych oraz umieszczenie w wirniku magnesów trwałych z ziem rzadkich, typu SmCo, o indukcji remanentu 1.1 [T].

2. Model polowy FEM

Z uwagi na trudności w opisie matematycznym maszyn LSPMSM, skutecznym i prostym narzędziem do analizy tego typu konstrukcji są programy do obliczeń polowych. W literaturze

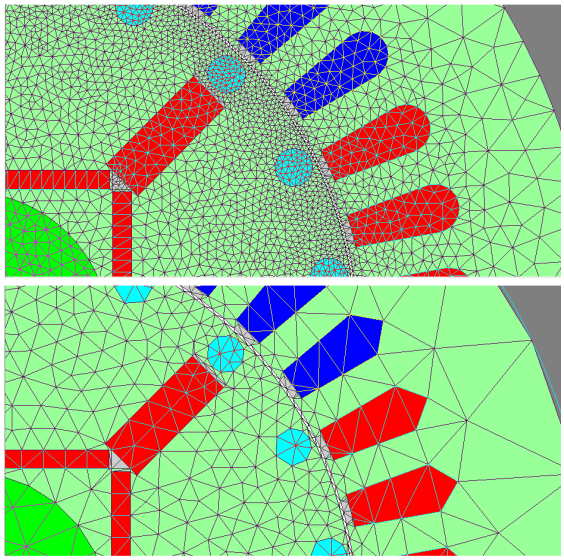
profesjonalnej analiza maszyn podobnych do LSPMSM jest często ograniczona właśnie do modeli polowych, służących realizacji zagadnienia syntezy projektowej, którego wyniki są weryfikowane przez pomiary na prototypie. Charakter polowy obliczeń i uwzględnienie nieliniowego charakteru obwodu magnetyczego pozwala na uzyskiwanie dobrego stopnia zgodności takiej weryfikacji.

Jednym z programów polowych jest Flux 2D, wykorzystujący metodę FEM i użyty w rozprawie. Definicja problemu sprowadza się w nim do określenia wymiarów obiektu i własności materiałowych, dzięki czemu można zasymulować pracę maszyny bez zgłębiania jej specyfiki. Zaletą wykorzystywanego programu jest możliwość zastosowania parametrów geometrii i analizy parametrycznej, a także zapewniającej szybką zmianę wymiarów modelu. Umożliwia on ponadto rozszerzenie modelu polowego o obwód elektryczny maszyny (tworzący model obwodowo-polowy), co pozwala na uwzględnienie napięciowego źródła zasilania, jak w przypadku rzeczywistej maszyny.



Rys. 2 Obwód elektryczny przyjęty w modelu FEM silnika LSPMSM. Oznaczenia: RA, RB, RC - rezystancja obwodu zasilania, V_AB, V_BC - napięcie zasilania, RCA-RCC, LSA-LSC - rezystancja i indukcyjność połączeń czołowych, RVA-RVC - rezystancje pomiarowe, elementy B_.. - reprezentacja grup uzwojeń stojana; symbole reprezentują sprzężenie obwodu elektrycznego z modelem polowym, w lewym górnym rogu – klatka wirnika

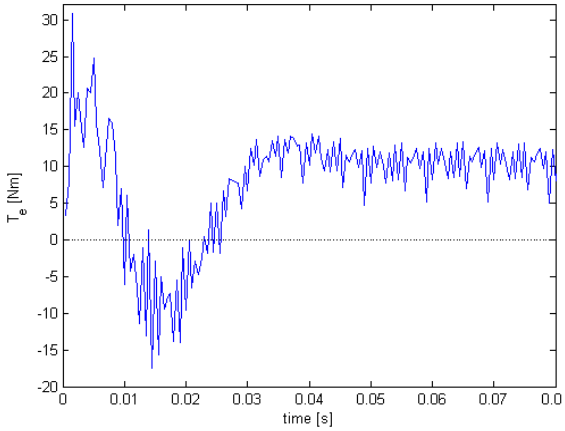
Główną wadą obliczeń polowych jest czas potrzebny na ich przeprowadzenie oraz obróbkę wyników. Czas obliczeń oraz ich dokładność są zależne od liczby elementów skończonych (lub węzłów), na które została podzielona analizowana struktura. Z tego względu niezwykle ważne jest zastosowanie zróżnicowanej gęstości siatki oraz odpowiednie jej zagęszczenie w obszarach o dużej zmienności strumiania magnetycznego, np. przy szczelinie powietrznej.



Rys.3 Różne możliwe warianty dyskretyzacji siatki w modelach polowych FEM. W rozprawie przyjęta siatka z górnego rysunku.

Dla przykładu z Rys. 3 czas obliczeń pojedynczego przypadku dla siatki bardziej dokładnej wynosił ok. 90 minut, co stanowiło kilkanaście razy dłuższy czas niż w drugim wariancie.

Czas potrzebny na obróbkę wynika także w dużej mierze z konieczności przeprowadzenia obliczeń w module do analizy stanów przejściowych. Jest to konsekwencja potrzeby równoczesnej analizy pola stałego od magnesów i zmiennego od przepływu stojana. Każdy wyznaczony punkt pracy jest efektem ustalenia się przebiegu, co wiąże się z koniecznością wykonania czasochłonnych obliczeń dla każdego takiego punktu.



Rys. 4 Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego w module do analizy stanów przejściowych w modelu FEM.

Wynikowa wartość analizowanego parametru, tj. momentu elektromagnetycznego, uwidacznia się w symulowanym punkcie pracy w wartości średniej na końcu stanu nieustalonego. Z tego względu konieczna jest dodatkowa obróbka wyników, co poza czasochłonnością utrudnia automatyzację procedury obliczeń.

3. Model analityczny

Podobnie jak model polowy, model analityczny wymaga znajomości zjawisk fizycznych występujących w maszynie, ale dodatkowo wymaga ich odpowiedniego opisania oraz przyjęcia uproszczeń, które pozwalają na odwzorowanie własności maszyny z odpowiednią dokładnością. W przypadku LSPMSM jest to o tyle trudne, że wymaga uwzględnienia jednocześnie pól stałych i zmiennych, jak również określenia wpływu rozmieszczenia i właściwości magnesów trwałych na własności maszyny. W niniejszej pracy przyjęto do analizy model monoharmoniczny, uwzględniający podstawowe harmoniczne przebiegów napięć i prądów. Jak wykazano w rozprawie, z perspektywy wyznaczania podstawowych własności mechanicznych maszyny określanych w przyjętej procedurze optymalizacji, analiza wyłącznie podstawowych harmonicznych tych wielkości jest wystarczająca.

Jako punkt wyjścia do analizy silnika LSPMSM przyjęto model analityczny klasycznej maszyny synchronicznej jawnobiegunowej po transformacji do współrzędnych Parka. Pole magnetyczne uzwojenia wzbudzenia zostało w modelu zastąpione polem magnetycznym generowanym przez układ magnesów trwałych, czego efektem jest otrzymanie następującego układu równań:

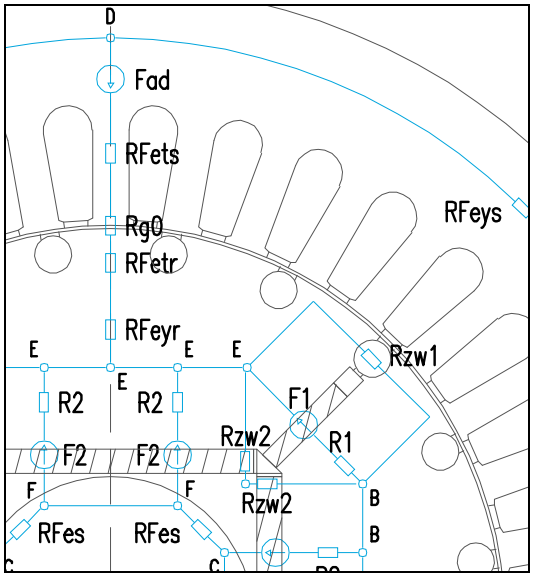
$$U_d = R_S \cdot i_d - \omega_0 \cdot \Psi_q$$
$$U_q = R_S \cdot i_q + \omega_0 \cdot \Psi_d$$
$$\Psi_q = i_q \cdot X_q / \omega_0$$
$$\Psi_d = \left(i_d \cdot X_d + E_{MAX}\right)/\omega_0$$
$$T_e = 3/2 \cdot p \cdot \left(\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d\right)$$

gdzie:

E_{MAX}	max siły elektromotorycznej indukowanej w rozwartych uzwojeniach stojana przez strumień od magnesów [V]
X_d, X_q	reaktancje synchroniczne w osiach dq [Ω]
Ψ_d, Ψ_q	strumienie magnetyczne w osiach dq [Wb]
U_d,U_q	napięcie zasilania w osiach dq [V]
i_d, i_q	natężenie prądu stojana w osiach dq [A]
R_S	rezystancja uzwojeń stojana [Ω]
ω_0	pulsacja synchroniczna [rad/s]
T_e	moment elektromagnetyczny [N·m]
p	liczba par biegunów

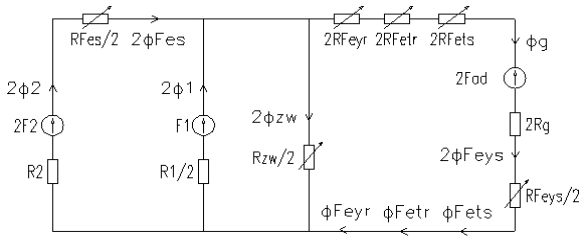
Podstawową trudnością w wykorzystaniu powyższego modelu jest konieczność oszacowania jego parametrów, w szczególności siły elektromotorycznej indukowanej przez magnesy oraz reaktancji synchronicznych w osiach *d* i *q*.

W zastosowanym modelu przyjęto liniową zależność *B*(*H*) magnesowania żelaza (model magnetycznie liniowy), uwzględniając nasycenie w postaci przyjęcia zadanej, stałej przenikalności magnetycznej we wszystkich elementach ferromagnetycznych. Wymienione parametry zostały określone z wykorzystaniem modelu obwodu magnetycznego maszyny, składającego się z siatki elementów reluktancyjnych, utworzonej na przekroju poprzecznym silnika. Poszczególne elementy obwodu odpowiadają różnym częściom ferromagnetycznym w maszynie: jarzmu stojana, zębom stojana, jarzmu wirnika, zębom wirnika, części żelaza przy wale. Strumień od okładu prądowego jest reprezentowany przez siłę magnetomotoryczną w szczelinie powietrznej, magnesy trwałe natomiast przez szeregowe połączenie siły magnetomotorycznej oraz reluktancji wewnętrznej.



Rys. 5 Wycinek przekroju LSPMSM ze schematem obwodu magnetycznego.

Po serii przekształceń i uproszczeń model taki pozwala na sprowadzenie problemu do schematu zastępczego, zaprezentowanego poniżej.



Rys. 6 Uproszczony schemat zastępczy obwodu magnetycznego LSPMSM.

Na podstawie powyższego schematu możliwe jest określenie zastępczej reluktancji magnetycznej szczeliny powietrznej stojan-wirnik, dla uwzględnienia spadków napięcia magnetycznego w częściach ferromagnetycznych.

$$R_g = R_{g0} + R_{Fe}$$

gdzie:

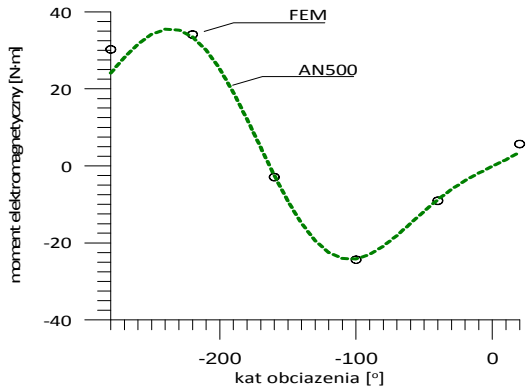
- R_g reluktancja szczeliny uwzględniająca spadki napięć magnetycznych w żelazie [1/H]
- R_{g0} reluktancja szczeliny bez spadków napięć magnetycznych, z uwzględnieniem współczynnika Cartera [1/H]
- R_{Fe} zastępcza reluktancja wszystkich elementów ferromagnetycznych, wynikająca ze schematu obwodu magnetycznego [1/H]

Zastępcza reluktancja szczeliny powietrznej może być następnie wykorzystana przy wyznaczeniu zastępczej szerokości szczeliny uwzględniającej spadki napięć magnetycznych w żelazie, indukcji w szczelinie od okładu prądowego stojana oraz reaktancji synchronicznych. Parametry wyznaczone w modelu analitycznym na podstawie modelu obwodu magnetycznego zostały zweryfikowane za pomocą modeli polowych wykorzystujących FEM z dobrą zgodnością.

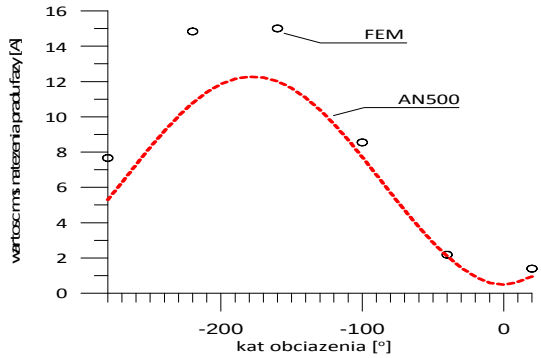
Model analityczny umożliwiał analizę wielkości takich jak przebieg indukcji magnetycznej w szczelinie, zębie i jarzmie stojana, straty mocy w żelazie, hałas generowany przez maszynę. Z jego użyciem (przy równaniach odpowiadających stanowi dynamicznemu) sprawdzane były także warunki przeciążalności maszyny oraz zdolności do rozruchu bezpośredniego. Opisany model analityczny opierał się w zasadzie wyłącznie o wymiary geometryczne oraz własności zastosowanych materiałów. Stanowi to niezwykle istotną zaletę w zastosowaniu do procesu optymalizacji konstrukcji LSPMSM, który był celem rozprawy.

4. Weryfikacja modelu analitycznego za pomocą modelu FEM

W niniejszym paragrafie przedstawiono częściowe wyniki porównania obliczeń modelu analitycznego z symulacjami przeprowadzonymi z wykorzystaniem modelu FEM. Porównanie dotyczy takich wielkości jak indukcje w wybranych częściah maszyny, straty mocy w żelazie, moment elektromagnetyczny oraz natężenie prądu w uzwojeniach stojana.



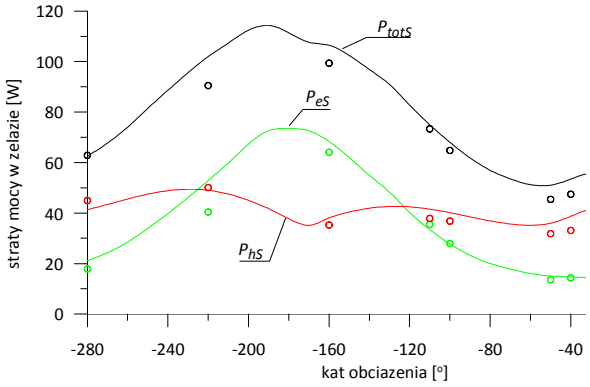
Rys. 7 Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obciążenia - model analityczny $\mu_{Fe,rel}$=500 (zielona linia) i model FEM (punkty).



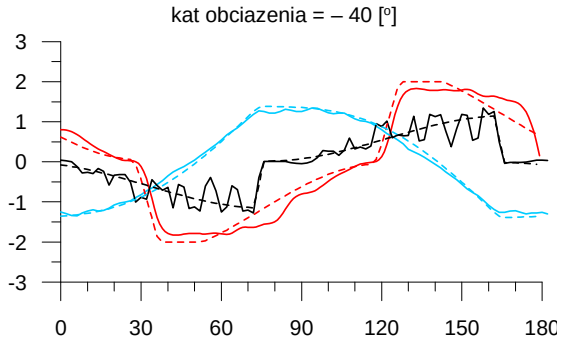
Rys. 8 Natężenie prądu fazy stojana w funkcji kąta obciążenia - model analityczny $\mu_{Fe,rel}$=500 (zielona linia) i model FEM (punkty).

Porównanie wyników obliczeń z modelu nieliniowego FEM i z modelu analitycznego o zastępczej względnej przenikalności magnetycznej $\mu_{Fe,rel}$=500 wykazuje dobrą zgodność w obszarze punktu pracy znamionowej. W rozprawie zamieszczono ponadto podobne porównanie przy pominięciu spadków napięć magnetycznych w żelazie, potwierdzające prawidłowość przyjętego modelu analitycznego. Lepszą zbieżność charakterystyk na rys. 8 w zakresie wyższych wartości natężeń prądu można uzyskać

przyjmując inną wartość $\mu_{Fe,rel}$, w rozprawie skupiono się jednak na analizie pracy w pobliżu punktu znamionowego, czemu odpowiadała przyjęta wartość zastępczej przenikalności żelaza, podana w opisie rysunku.



Rys. 9 Porównanie strat w żelazie: histerezowych P_{hS} (czerwony), od prądów wirowych P_{eS} (zielony) oraz całkowitych P_{totS} (czarny) pomiędzy modelem FEM (punkty) oraz modelem analitycznym (linia ciągła) dla różnych wartości kąta obciążenia.



Rys. 10 Porównanie składowej normalnej indukcji: w szczelinie (czarny), w zębie (czerwony) oraz w jarzmie stojana (niebieski) dla modelu analitycznego (linia przerywana) i FEM (linia ciągła) dla wybranej wartości kąta obciążenia - zależność indukcji [T] od położenia kątowego [°].

Porównanie przebiegów z rys. 9 i 10 wskazuje na dobre odwzorowanie własności maszyny przy pomocy przyjętego modelu analitycznego magnetycznie liniowego uwzględniającego spadki napięć magnetycznych w żelazie, szczególnie przy obciążeniu bliskim znamionowemu. Różnice na przebiegach wynikają głównie z braku uwzględnienia wyższych harmonicznych pola, w szczególności harmonicznych żłobkowych.

5. Wykorzystanie modelu analitycznego i FEM w zagadnieniu optymalizacji konstrukcji

Zaproponowany w rozprawie model analityczny został stworzony z myślą o wykorzystaniu w procesie optymalizacji. Było to możliwe ze względu na jego prostotę, możliwość wyznaczenia parametrów z wymiarów geometrycznych i własności materiałowych, a także z uwagi na dobre odwzorowanie własności maszyny w pobliżu znamionowego punktu pracy.

Do wad modelu analitycznego należy zaliczyć konieczność przyjęcia pewnych założeń upraszczających. Są one wynikiem konieczności opisu zjawisk i zależności występujących w maszynie przy pomocy relacji matematycznych, które odwzorowują te zjawiska z pewną niedokładnością. Niedogodnością stosowania modeli obwodowych jest również fakt, że wraz ze stopniem skomplikowania opisu maszyny (jak np. konieczność uwzględnienia interakcji pola stałego od magnesów i zmiennego od okładu prądowego stojana) rośnie stopień skomplikowania modelu. Z tego względu model taki musi być stosunkowo prosty, aby mógł być z powodzeniem zastosowany w automatycznej procedurze optymalizacyjnej, a jednocześnie symulować zachowanie rzeczywistej maszyny z zadowalającą dokładnością.

Bardziej dokładnym narzędziem są w tym przypadku modele FEM, w których charakter obliczeń odpowiada polowemu charakterowi zjawisk zachodzących w rzeczywistej maszynie. Dzięki temu nie ma potrzeby dobrej znajomości zależności i zjawisk występujących w maszynie.

Główną wadą modeli polowych w zastosowaniu do procedury optymalizacyjnej jest czasochłonność obliczeń i obróbki danych. Wada ta uwidacznia się szczególnie w razie konieczności zmian parametrów modelu lub typów zastosowanych materiałów, wynikających np. z błędnych założeń na początku procedury optymalizacyjnej, postępu technologicznego, dostępności materiałów lub radykalnej zmiany cen zastosowanych materiałów. W takim przypadku procedura musi być powtórzona w całości lub w części, co oznacza konieczność ponownego wyboru i przeliczenia znacznej ilości punktów obliczeniowych oraz obróbki ich wyników (przy założeniu, że nie zostało utworzone dedykowane narzędzie umożliwiające automatyzację procedury obliczeniowej). Dla kontrastu, w modelu analitycznym ta sama zmiana sytuacja wiąże się z koniecznością zmiany kilku linii kodu źródłowego i uzyskaniu wyników

bezpośrednio w żądanej formie po stosunkowo krótkim czasie, poprzez "kliknięcie".

W trakcie pisania rozprawy została przeprowadzona analiza czasochłonności obliczeń w modelach FEM, w odniesieniu do działań optymalizacyjnych podobnych do zastosowanych w rozprawie z wykorzystaniem modelu analitycznego. Jej wyniki zostały zawarte w artykule [13], którego autor rozprawy jest współautorem. Z wyników tych płyną następujące informacje:

- ilość iteracji potrzebnych do określenia punktu optymalnego dla założonego w artykule problemu wiązała się z koniecznością wyznaczenia blisko 7000 punktów obliczeniowych
- czas przeprowadzenia procedury optymalizacji skalarnej przy pomocy zaprezentowanego w rozprawie modelu analitycznego wyniósł 192 sekundy, przy czym szacowany czas analogicznych obliczeń z wykorzystaniem modelu FEM został określony na ok. 120 dni
- przy założeniu oczekiwanej dokładności obliczeń FEM na poziomie <0.2%, oznaczającej odpowiedno gęstą siatkę elementów skończonych, czas obliczeń dla pojedynczego punktu pracy wynosił ok. 90 minut na wykorzystywanym komputerze klasy PC
- zastosowanie siatki o mniejszej gęstości jak na Rys. 3 przyniosło skrócenie czasu obliczeń z 90 minut (dla bardziej gęstej siatki z Rys. 3) do 5 minut, przy zachowaniu błędu obliczeń rzędu 1%
- czas opracowania i obróbki wyników dla pojedynczego punktu obliczeniowego w modelu FEM wynosił ok. 10 minut, niezależnie od przyjętej gęstości siatki.

Wniosek płynący z powyższej analizy jest taki, że optymalizacja z wykorzystaniem modeli polowych musi być poprzedzona dobrze zaplanowanym wyborem punktów obliczeniowych. Z uwagi na konieczność obróbki i analizy wyników, na podstawie których następuje wybór kolejnych punktów obliczeniowych, celowe wydaje się być stopniowe zwiększanie gęstości siatki modelu, dla uzyskania żądanej dokładności na końcu procedury optymalizacyjnej, a zapewniające mniejszą czasochłonność obliczeń na jej początku. Z uwagi na sumaryczny czas obliczeń i ilość potrzebnej pracy przy przygotowaniu modeli, zmianie ich parametrów oraz obróbce wyników, celowość optymalizacji z wykorzystaniem wyłącznie modeli polowych wydaje się być problematyczna. W rozprawie obliczenia FEM wykorzystano głównie do weryfikacji rozwiązań otrzymanych przy użyciu opisanego modelu analitycznego.

6. Przykłady problemów optymalizacji

W rozprawie przedstawiono dwa przykłady zadania programowania matematycznego, z wykorzystaniem optymalizacji skalarnej i bikryterialnej. W pierwszym przypadku zadanie dotyczyło poszukiwania maksimum sprawności maszyny, co można zapisać za pomocą warunku:

$$\max \eta_N \left| \mathbf{x} \in X \right.$$

gdzie:

- $\mathbf{x}$ wektor 15-tu zmiennych optymalizacyjnych, głównie wymiarów geometrycznych i parametrów uzwojeń
- η_N znamionowa sprawność silnika [%]
- X obszar dopuszczalny

Drugi z opisanych w rozprawie problemów dotyczył uwzględnienia dodatkowego kryterium, w postaci kosztu materiałów aktywnych, z których wykonana jest maszyna:

$$\max_{\mathbf{x}} \eta_N, \min_{\mathbf{x}} Q_{ma} \left| \mathbf{x} \in X,\ \eta_N \geq 0.772 \right.$$

gdzie:

- Q_{ma} koszt materiałów aktywnych (rdzenie wirnika i stojana, uzwojenie stojana i magnesy trwałe) oraz wału [zł]

W obydwu przypadkach obszar dopuszczalny został zdefiniowany przy pomocy szeregu ograniczeń liniowych i nieliniowych, w postaci:

$$X = \left\{ \mathbf{x} \,\middle|\, l_i \leq x_i \leq u_i, \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \right\}$$

gdzie:

- l_i, u_i dolna i górna graniczna wartość poszczególnych zmiennych optymalizacji x_i (i=1:n)
- $\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ wyrażenie odpowiadające za zbiór nierównościowych ograniczeń liniowych
- $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ wektor pięciu nieliniowych funkcji ograniczających

Nieliniowe funkcje ograniczające **g**(**x**) dotyczyły takich własności jak: ciężar maszyny, współczynnik wypełnienia żłobka, moment maksymalny synchroniczny oraz zdolność do rozruchu bezpośredniego (dwa warunki dla tej własności).

Rozwiązanie określonych powyżej problemów zostało wyznaczone poprzez wykorzystanie jednej z najbardziej efektywnych metod gradientowych w zastosowaniu do optymalizacji maszyn elektrycznych, tj. metody kolejnych przybliżeń kwadratowych SQP.

W obydwu rozważanych zagadnieniach uzyskano istotny wzrost sprawności, przy czym w odniesieniu do optymalizacji bikryterialnej wykazano, że konstrukcja LSPMSM umożliwia uzyskanie sprawności spełniającej wszystkie klasy IE1-IE4 zdefiniowane w aktualnych standardach IEC (IEC 60034-30 z roku 2008 oraz IEC 60034-31 ed. 1 z roku 2010), w zależności od przyjętego dopuszczalnego kosztu maszyny.

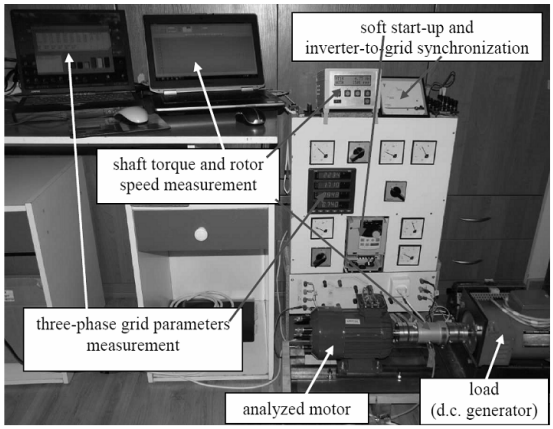
Wyniki obliczeń optymalizacyjnych zostały zweryfikowane przy wykorzystaniu modeli polowych FEM z dobrą zgodnością.

7. Prototyp LSPMSM

Dla celów ostatecznej weryfikacji poprawności przyjętego modelu i procedury optymalizacyjnej, wykonane zostały obliczenia w modelu analitycznym dla określenia maszyny optymalnej pod kątem sprawności, o mocy znamionowej 750 [W]. Wyniki zweryfikowano z wykorzystaniem modelu FEM. Na tej podstawie wykonano prototyp LSPMSM.

Rys. 10 Wirnik wykonanego prototypu LSPMSM w trakcie montażu.

Pomiary zostały wykonane na utworzonym stanowisku pomiarowym, jak na rys. 11.



Rys. 11 Stanowisko pomiarowe.

Wykonane pomiary wykazały, że prototyp spełnił założenia projektowe, wynikające z obliczeń modelu analitycznego i potwierdzone w modelu FEM. Wyznaczona na podstawie wskazań przyrządów sprawność została określona na poziomie 89.1%. Wynik ten spełnił oczekiwania płynące z obliczeń w modelu analitycznym oraz potwierdził osiągnięcie założonego celu rozprawy, którym było uzyskanie sprawności spełniającej wymagania najbardziej restrykcyjnych standardów, w tym klasy IE4 wg najnowszych norm IEC.

8. Wnioski

Teza pracy, tj.: "Postępowanie projektowe dla silników synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (ang. LSPMSM), wykorzystujące model analityczny i algorytmy gradientowe do optymalizacji oraz modele polowe do zwiększenia dokładności wyjściowego modelu analitycznego, jest wystarczająco skutecznym narzędziem do uzyskania rzeczywistego silnika o ekstremalnej sprawności znacznie wyższej od np. sprawności odpowiadającego silnika indukcyjnego." została udowodniona poprzez otrzymane wyniki działań optymalizacyjnych i zweryfikowane przy pomocy obliczeń polowych oraz pomiarach na prototypie.

Cel rozprawy, jakim było opracowanie skutecznego narzędzia w postaci modelu analitycznego LSPMSM i wykonanie na jego podstawie maszyny o optymalizowanej sprawności, wyższej od dolnej granicy klasy sprawności IE4 i nie odbiegającej od najlepszych tego typu silników na rynku, został osiągnięty.

9. Publikacje autora rozprawy

[1] M. Bajek, T. Bąk, W. Jażdżyński *„Analiza własności silnika indukcyjnego synchronizowanego (LSPMSM) metodą obliczeń polowych”*, 2005, Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego Nr 7: Referaty Laureatów XLII Sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego Akademii Górniczo-Hutniczej, Wydawnictwo Studenckiego Towarzystwa Naukowego, Kraków, str. 53÷57

[2] W. Jażdżyński, M. Bajek, T. Bąk, M. Majchrowicz *„Modelowanie i przykłady analizy własności silnika asynchronicznego synchronizowanego (LSPMSM) oraz reluktancyjnego (SRM) z wykorzystaniem programu FLUX 2D”*, 2005, Materiały Konferencyjne XLI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME '2005, 14-17 czerwiec, Opole-Jarnotłówek, str. 136÷141

[3] M. Bajek "*Analiza własności silnika indukcyjnego i asynchronicznego synchronizowanego metodą polową*", 2006, praca magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

[4] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Wybrane konstrukcje silników indukcyjnych synchronizowanych (LSPMSM) – analiza porównawcza”*, 2006, Materiały Konferencyjne XLII Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME '2006, 3-6 lipiec, Kraków, str. 207÷210

[5] M. Bajek *„Wybrane problemy silników indukcyjnych synchronizowanych z magnesami trwałymi (LSPMSM)”*, 2007, Elektrotechnika i Elektronika, wyd. AGH, tom 26, zeszyt 1-2, str. 1÷6

[6] M. Bajek *„Analiza własności jednofazowego silnika z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim”*, 2008, Automatyka, wyd. AGH, tom 12, nr 1/2008, str. 19÷27

[7] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Wpływ struktury wirnika na niektóre własności silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM)”*, 2008, Przegląd Elektrotechniczny, luty, tom 84, str.117÷121

[8] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Obliczenia analityczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) z pominięciem zjawisk nieliniowych*", 2009, Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe Bobrme-Komel, Katowice, nr 83, str. 73÷76

[9] M. Bajek "*Analiza silnika LSPMSM z magnesami w kształcie "C" oraz wpływu nasycenia żelaza na jego własności*", 2010, Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe Bobrme-Komel, Katowice 2010, nr 88, str.75÷80

[10] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Wyznaczanie i analiza granicznych własności optymalizowanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM)*", 2010, Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe Bobrme-Komel, Katowice, nr 87, str. 91÷94

[11] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Optimization of construction of a line start permanent magnet synchronous motor with the use of a magnetically linear analytical model*", 2010, Przegląd Elektrotechniczny, tom 86, nr 7/2010, str. 330÷337

[12] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Modeling and bi-criterial optimization of a line start permanent magnet synchronous machine to find an IE4 class high-efficiency motor*", 2010, International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEM 2010, Rzym, Włochy, 6-8 wrzesień, artykuł RF-002232, str. 1÷6, materiały konferencyjne

[13] W. Jażdżyński, M. Bajek *„Comparison of FEM and lumped parameter models in application to optimization of a LSPMSM construction*", 2011, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe Bobrme-Komel, Katowice, nr 92, str. 39÷44

[14] M. Bajek *„Determining LSPMSM model parameters - a comparison of FEM and analytical approach with respect to optimization*", 2011, XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, ISEF2011, Madera, Portugalia, 1-3 wrzesień

[15] W. Jażdżyński, M. Bajek *„A comparison of operation properties of a high-efficiency squirrel-cage induction motor and LSPMSM”*, 2012, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, tom 1, str. 238-243.