

Porównanie struktury geometrycznej silników liniowych typu transformatorowego i cylindrycznego

Streszczenie. Przedmiotem pracy są silniki liniowe indukcyjne, tubowy oraz transformatorowy. Przedstawiono konstrukcje obu silników. Zawarto wyniki obliczeń dwuwymiarowych i trójwymiarowych modeli polowych. Przedstawiono również obliczenia silników metodami analitycznymi i ich analizę cieplną.

Abstract. In this paper the transformer type and the tubular type linear motors have been considered. The construction of the motors is described. Results of the characteristics and parameters calculations of the considered motors using two-dimensional and three-dimensional field models, and analytical methods have been presented. Also the results of the motor thermal analysis are presented. Finally, chosen calculation results have been compared with the measurement results obtained for the considered motors. (**Comparison of the geometrical structure of linear tubular and transformer motors**)

Słowa kluczowe: silnik liniowy, silnik tubowy, silnik transformatorowy, modele polowe, metoda elementów skończonych

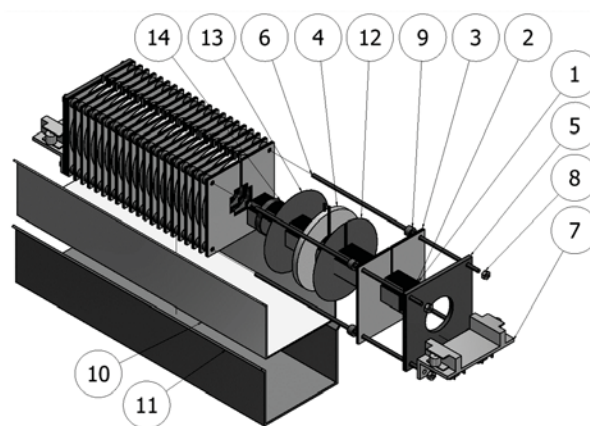
Keywords: linear motor, tubular motor, transformer-type motor, field models, finite element method

Wstęp

Silniki elektryczne liniowe są wynikiem transformacji struktur geometrycznych różnych typów silników obrotowych. Prowadząc pozorne rozcięcie od środkosi wału wzdłuż promienia do zewnętrznej powierzchni maszyny, a następnie rozwijając wzbudnik i twornik, otrzymuje się silnik liniowy płaski. Taki silnik będzie wykonywał ruch liniowy i będzie on działał na tej samej zasadzie jak jego obrotowy odpowiednik pomimo deformacji konstrukcji przestrzennej i występujących w nim niekorzystnych zjawisk zwanych efektem krańcowym dynamicznym i statycznym oraz efektem brzegowym. Wykonania specjalne maszyn elektrycznych, cechujące się odpowiednio umiejscowionymi obwodami elektrycznymi zarówno w bieźni jak i bieźniku pozwalają nawet na uzyskanie dwóch lub trzech niezależnych kierunków ruchu, albo toczenie się wirnika [1]. Eliminacja efektu brzegowego poprzez zamknięcie szczeliny powietrznej na obwodzie w płaszczyźnie nieprostopadłej do kierunku ruchu upodabnia silniki liniowe do maszyn obrotowych. Jeżeli wziąć pod uwagę silnik liniowy jednostronny, to znaczy taki, w którym wzbudnik oddziałuje na twornik tylko z jednej strony i poddać analizie porównawczej dwie typowe struktury geometryczne takiego silnika, a mianowicie strukturę transformatorową oraz tubową, zwaną też cylindryczną to okaże się, że tylko w pierwszej występuje wspomniany już efekt brzegowy. Dodatkową zaletą geometrii tubowej jest, w założeniu przypadku idealnego tzn. przy zachowaniu takiej samej szczeliny powietrznej na całym obwodzie twornika, znoszenie się siły naciągu magnetycznego działającej w kierunku prostopadłym do siły ciągu. W konsekwencji istnieje możliwość znacznego zmniejszenia rozmiarów szczeliny, bez obaw kontaktu mechanicznego części ruchomej i nieruchomej, tak samo jak ma to miejsce w silnikach elektrycznych o ruchu obrotowym [2]. Te cechy szczególne silników tubowych powodują, że przy założeniu niezmienności ciałys i objętości obwodu elektrycznego i magnetycznego twornika i wzbudnika w stosunku do silników transformatorowych, wykazywać powinny one lepsze właściwości przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną. Jest to spowodowane korzystniejszymi parametrami eksploatacyjnymi.

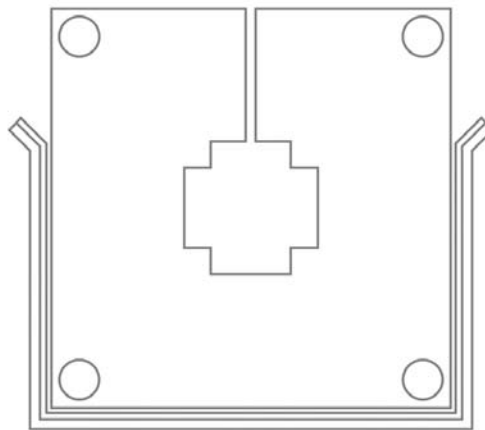
Koncepcja projektowa i opracowanie konstrukcji silnika tubowego

Głównym kryterium przyjętym w trakcie prowadzenia prac projektowych było zachowanie stałości podstawowych wymiarów i objętości silnika tubowego w stosunku do istniejącego silnika transformatorowego (rys. 1).



Rys. 1. Wygląd silnika transformatorowego. nr 1 – blacha jarzma mała, nr 2 – blacha jarzma duża, nr 3 – blacha zęba, nr 4 – cewka, nr 5 – płyta krańcowa, nr 6 – pręt tekstolitowy, nr 7 – zestaw jezdny, nr 8 – nakrętka, nr 9 – dystans, nr 10 – twornik aluminiowy, nr 11 – twornik stalowy, nr 12, 13, 14 - izolacja

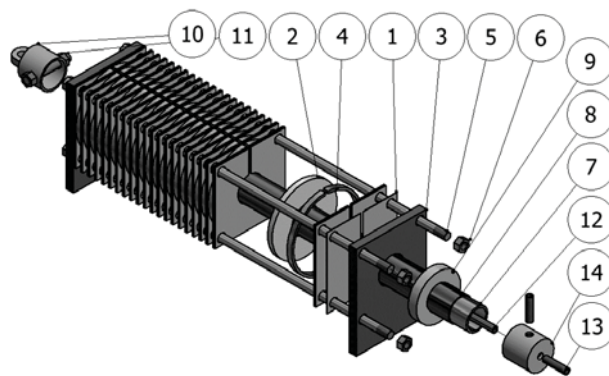
W przypadku symulacji metodą elementów skończonych modeli dwuwymiarowych występuje problem odwzorowania efektywnej szerokości szczeliny powietrznej silnika transformatorowego. Nieobrotowa bryła, którą tworzy bieźnia silnika, głównie ze względu na kwadratowe blachy zębów wzbudnika oraz bieźnik wykonany z profilu u-kształtowanego, uniemożliwiają dokładne odwzorowanie geometrii w przestrzeni dwuwymiarowej.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny struktury silnika transformatorowego w płaszczyźnie nieprostopadłej do kierunku ruchu

Jak przedstawiono na rysunku 2 w rzeczywistość ci wzbudnik charakteryzuje się trzema płaszczyznami oddziaływania na część ruchomą. Dodatkowo nie można przyjąć, że efektywna długość szczeliny powietrznej jest sumą odcinków twornika będących równoległymi do wspomnianych płaszczyzn ze względu na kształt uzwojeń które sprawiają, że oddziaływanie nie jest jednakowe wzdłuż tych odcinków. W zaistniałej sytuacji przyjęto za wystarczająco dokładne stwierdzenie, że szerokość strefy aktywnej w silniku transformatorowym jest nie mniejsza niż 120 mm i nie większa niż 160 mm. Kierując się tym założeniem zaprojektowano lite uzwojenie twornika silnika tubowego w postaci rury wykonanej z miedzi. Rura ma ścianę grubości 1,5 mm i średnicę zewnętrzną 42 mm, a więc obwód zewnętrzny ok. 132 mm. Miedź jako materiał o wyższej przewodności elektrycznej od aluminium – surowca użytego do budowy litego uzwojenia twornika w silniku transformatorowym – wpływa w pewnym stopniu na zmianę warunków generowania siły ciągu. Ponadto grubość warstwy miedzi została nieznacznie zredukowana względem grubości aluminium – o 0,5 mm. Jarzmo twornika silnika tubowego zaprojektowano jako rurę stalową o grubości 3,25 mm, czyli nieznacznie grubszą, niż grubość jarzma twornika silnika transformatorowego, która wynosi 3 mm. Zdecydowano się na zredukowanie grubości szczeliny powietrznej z 1,5 mm w wariancie transformatorowym do 1,25 mm w wariancie tubowym. Tak więc grubość całkowitej szczeliny magnetycznej została zmieniona z 3,5 mm do 2,75 mm. Takie działanie uwarunkowane było możliwością zmniejszenia reluktancji magnetycznej na drodze strumienia magnetycznego w szczelinie. Pozwalało to na podwyższenie sprawności przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną, bez obaw występowania niekorzystnych skutków naciągu magnetycznego działającego w płaszczyźnie nieprostopadłej do kierunku ruchu. Naciąg taki bowiem w silniku cylindrycznym ulega całkowitej redukcji przy założeniu istnienia idealnie symetrycznej geometrii struktury przyszczelinowej maszyny, co upodabnia go do silników obrotowych. Dalsza redukcja szczeliny magnetycznej z teoretycznego punktu widzenia powinna wpłynąć na jeszcze lepsze przetwarzanie energii. Stwarzałyby jednak więcej problemów w procesie budowy wzbudnika i mogłyby przyczynić się do kleszczenia twornika w przypadku nadmiernego rozgrzania wynikającego z przepływu miejscowych prądów wirowych. Uzwojenie wzbudnika silnika tubowego zaprojektowano w postaci cewek krążkowych o średnicach wewnętrznych ok. 46 mm i ilości cizwojów 93, analogicznie do silnika transformatorowego. Otrzymane średnice wewnętrzne cewek krążkowych powinny wynieść w przybliżeniu 117 mm. Jarzmo wzbudnika silnika tubowego powinno mieć możliwie takie samo pole powierzchni bocznej jak miało jarzmo wzbudnika silnika transformatorowego. W istniejącej konstrukcji silnika transformatorowego pole to wynosiło 1344 mm^2 . W procesie opracowania technologii wykonania silnika tubowego stwierdzono, że element ten stworzony zostanie z wykorzystaniem grubości ciennej rury stalowej. Projekt musiał więc w pewnym stopniu zostać przystosowany do dostępnych na rynku materiałów zgodnych z istniejącym typoszeregiem. Zdecydowano, że zastosowanie rury o średnicy wewnętrznej 119 mm i średnicy zewnętrznej 127 mm, a więc pola powierzchni równemu w przybliżeniu 1546 mm^2 pozwoli na uzyskanie dostatecznie podobnego obszaru przeznaczonego na przepływ strumienia magnetycznego. W celu eliminacji możliwości powstawania niepożądanego efektu prądów wirowych generowanych w elementach jarzma, zamykających się w płaszczyźnie nieprostopadłej do kierunku ruchu zaprojektowano kil-

kumilimetrowej szerokości cięcia rury. Powstała w wyniku tego szczelina umożliwi również wyprowadzenie wewnętrznych zakończeń cewek krążkowych na powierzchnię wzbudnika w celu połączenia uzwojenia. Pakiety blach składające się na zęby wzbudnika zaprojektowano w taki sposób, aby miały one kształt kwadratów oraz pole powierzchni w płaszczyźnie nieprostopadłej do kierunku działania siły ciągu możliwie odpowiadające analogicznemu polu powierzchni silnika transformatorowego. W centralnym punkcie blachy zaprojektowano otwór wewnętrzny pozwalający na swobodny ruch bieźnika powiększony o założoną wartość szczeliny magnetycznej, a więc o średnicę 44,5 mm. Od krawędzi otworu wzdłuż jego promienia poprowadzono wycięcie o szerokość 4,5 mm na zewnątrz blachy, którego funkcje są takie same jak funkcje rozcięcia w obręczach tworzących jarzmo wzbudnika. Bok kwadratu blachy powinien mieć długość 128 mm, aby dokładnie odwzorować pole powierzchni blachy silnika transformatorowego. W celu ułatwienia procesu pakietowania oraz korygowania położenia poszczególnych elementów konstrukcyjnych wzbudnika, zdecydowano się na zmniejszenie długości boku do 127 mm w celu ujednoczenia tego wymiaru ze średnicą pierś cieniaworzącego jarzmo bieźni. Skutkowało to zmniejszeniem pola powierzchni blachy zęba o ok. 220 mm^2 , czyli ok. 1,6 % powierzchni, co jednak nie powinno znacznie zaburzyć warunków porównania obu silników. Mniejsze otwory w rogach blachy zaprojektowano w celu przepuszczenia stalowych szpilek spinających konstrukcję. Na etapie projektowania silnika tubowego jako maszyny wchodzącej w skład stanowiska do badań statycznej siły ciągu przewidziano konieczność umieszczenia na jednym z końców twornika uchwytu umożliwiającego pomiar siły. Mając również na uwadze zjawisko znacznego nagrzewania silnika zaproponowano rozwiązanie odprowadzania ciepła z litego bieźnika przy pomocy wymuszonego przepływu medium chłodzącego poruszającego się wzdłuż twornika. Usytuowanie zarówno wlotu jak i wylotu cieczy po jednej stronie bieźnika zrodziło konieczność umieszczenia w jego wnętrzu przewodu prowadzącego przez prawie całą długość będącego częścią systemu nadającego odpowiednią drogę cyrkulacji płynu.



Rys. 3. Wygląd silnika tubowego. nr 1 – blacha zęba, nr 2 – cewka, nr 3 – płyta krańcowa, nr 4 – blacha jarzma, nr 5 – pręt stalowy, nr 6 – nakrętka, nr 7 – twornik stalowy, nr 8 – twornik miedziany, nr 9 – ślizg, nr 10 – uchwyt, nr 11 – mocowanie, nr 12 – rura mosiężna, nr 13 – króciec, nr 14 – końcówka umożliwiająca przepływ cieczy w tworniku

W procesie opracowania konstrukcji silnika dołożono wszelkich starań, aby nowoprojektowana maszyna spełniała warunki analogii w stosunku do istniejącego już modelu transformatorowego. Niewielkie różnice, pomimo których, obie struktury można traktować jako tożsame, wystąpiły ze względu na konieczność projektowania poszczególnych ele-

mentów składowych z materiałów dostępnych na rynku i występujących jedynie w okresie lonychtyposzeregiem rozmiarach. Ostateczny wygląd konstrukcji silnika tubowego przedstawiony jest na rysunku 3.

Wspomaganie projektowania silnika tubowego metodą elementów skończonech

Proces projektowania silnika tubowego, podobnie jak w przypadku projektowania silnika transformatorowego, obejmował obliczenia elektromagnetyczne metodą elementów skończonech. Po ustaleniu podstawowych wymiarów maszyny odpowiadającej objętości ciwo modelowi transformatorowemu zrealizowano szereg modeli polowych w oprogramowaniu polowym Opera. Mając na celu obliczenie przewidywanych parametrów siły ciągu przy takim samym prądzie znamionowym konieczne było dokładne określenie wymiarów uzwojeń w żłobkach oraz uwzględnienie materiałów izolacyjnych. Model dwuwymiarowy został przygotowany w dwóch wariantach: uproszczonym oraz pełnym. Oba warianty modeli generowane są na podstawie sparametryzowanego skryptu, co znacznie ułatwia szybkie przeprowadzanie kolejnych obliczeń przy niewielkich zmianach wymiarów geometrycznych, jak również zmianach innych parametrów modeli. Wzbudnik wariantu uproszczonego modelu dwuwymiarowego projektowanego silnika tubowego składa się z 6 cewek (dwa bieguny), 7 zębów oraz jarzma. Bieżnik składa się klasycznie z dwóch elementów: jarzma, które stanowi stal i miedzianego uzwojenia zwartego, odpowiednio skróconych do wymiarów wzbudnika. Góra i dół modelu zostały otoczone powietrzem. Ze względu na charakter modelu tj. jego skrócenie poprzez modelowanie tylko 6 żłobków zamiast 21 niezbędne było pomnożenie obliczonej siły ciągu 3,5 razy. Ponadto na krawędziach modelu zastosowano symetryczne warunki brzegowe. Ów zabieg spowodował wyeliminowanie efektu krańcowego z modelu co jest istotne szczególnie ze względu na jego znaczny wpływ przy tak małej liczbie biegunów w tworzonym modelu. Jednocześnie taki zabieg może skutkować nieco zawyżoną wartością siły ciągu, gdyż w pełnym modelu wspomniany efekt występuje, co powinno obniżyć jej wartość. Wykonane obliczenia dla prądu fazowego o wartości 10 A wykazały, że model ten charakteryzuje się siłą o wartości co najmniej 334 N. Na rysunku 4 przedstawiono rozkład pola w tym modelu dla trzech kątów fazowych. Siła w tym modelu została policzona 3 różnymi metodami. Pierwsza z nich to zalecana w dokumentacji programu metoda oparta na całkowaniu tensora naprężeń Maxwella wokół konturu elementu ruchomego. Metoda ta wykazała siłę najniższą, wcześniej nie wspomnianą, o wartości 334 N. Druga metoda również polega na całkowaniu tensora naprężeń Maxwella, lecz tylko w szczelinie. Ponieważ wyniki tej metody są niezależne od położenia trajektorii całkowania zdecydowano się na wykonanie całkowania w 5 różnych wysokościach szczeliny, a następnie obliczono średnią arytmetyczną z wyników. Ostatecznie w tej metodzie odnotowano siłę o wartości 344 N. Trzecia metoda polegała na całkowaniu powierzchniowym uzwojenia bieżnika. Metoda ta pozwoliła na uzyskanie największej wartości siły, dokładnie 357 N. W każdej z metod istnieje jednakże niepewność dlatego wydaje się poprawnym przyjąć jako ostateczny wynik najgorszy. Wyniki w metodzie pierwszej oraz drugiej zależą od parametru określającego dokładność całkowania numerycznego metodą Rungego-Kutty. W tablicy 1 przedstawiono wyniki w zależności od tego parametru. W miarę zwiększania dokładności wszystkie metody zbliżały się do tej samej wartości siły, czyli około 358 N.

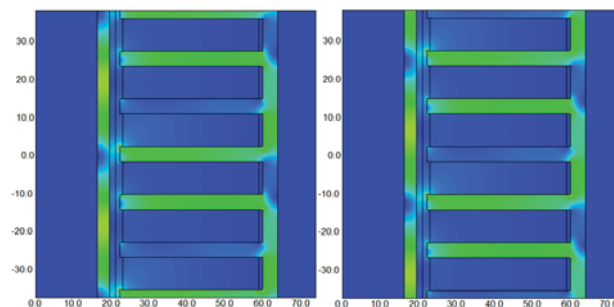
Tabela 1. Wyniki obliczeń siły dla różnych wartości tolerancji całkowania numerycznego metodą Rungego-Kutty.

Tolerancja	F [N] kontur	F [N] linie
0,01 (domyślna)	334,3	344,9
0,001	358,1	362,1
0,0001	357,7	358,4
0,00001	357,8	358,2

Tabela 2. Wyniki obliczeń siły dla różnych wartości liczby punktów całkowania numerycznego metodą Simpsona.

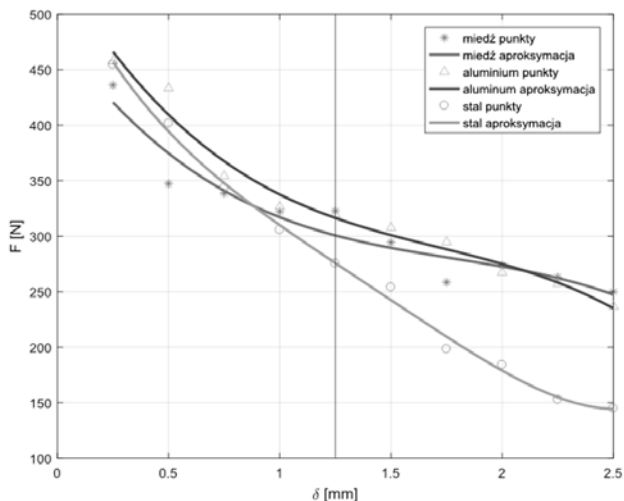
Liczba punktów	F [N] kontur	F [N] linie
10	371,7	389,3
100	357,8	356,5
1000	357,8	357,4

W przypadku zastosowania całkowania numerycznego metodą Simpsona (tab. 2) o dokładności rozwiązania decyduje liczba równoodległych punktów między którymi obliczana całość jest przybliżana parabolami. Zatem zwiększanie liczby punktów będzie prowadzić do dokładniejszego rozwiązania. W przypadku tej metody obserwowana jest odwrotna tendencja niż w metodzie Rungego-Kutty. Przy małej liczbie punktów siła jest zawyżana jednak już druga wartość, 100 punktów prowadzi do wystarczająco dokładnego rozwiązania całości. Zwiększanie dokładności obu metod całkowania numerycznego jest obciążone wadą w postaci nieco dłuższego czasu trwania obliczeń.

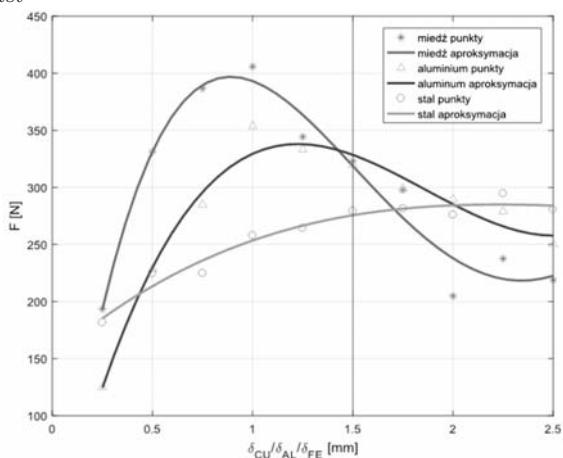


Rys. 4. Rozkład pola w rozwiązującym modelu uproszczonym dla kąta fazowego a) 0° b) 60°

Analizując wyniki zobrazowane na wykresie siły ciągu w zależności od grubości szczeliny powietrznej (rys. 5) można zauważyć interesujące właściwości badanego silnika tubowego. Mianowicie w przypadku rozważania wartości siły w funkcji grubości szczeliny powietrznej dla wartości 2 mm-owej szczeliny między stajnie materiałem lepszym w kontekście ciegenerowanej siły. Zatem zastosowanie tańszego aluminium w konstrukcjach o grubości szczeliny mniejszej niż 2 mm może wpłynąć na polepszenie wartości siły ciągu. Zastosowanie wyłącznie stalowego bieżnika zapewni siłę ciągu, która może być satysfakcjonująca, szczególnie przy małej grubości szczeliny magnetycznej. Niewątpliwie w konstrukcjach, gdzie istotne byłoby cena oraz wymagania dużych wymiarów, związane np. z koniecznością zachowania wysokiej wytrzymałości bieżnika, stal może okazać się lepszym rozwiązaniem. Tak korzystne wartości siły ciągu litej stali konstrukcyjnej wynikają ze znacznie większej rezystancji tego materiału. Należy pamiętać, że jest to właściwość korzystna przy bardzo dużych prądach. Wraz ze zmniejszaniem się prądów charakterystyka siły takiego silnika będzie znacznie szybciej opadać w przeciwnie stwierdzonego uzwojenia zwartego wykonanego z miedzi czy aluminium. Również wzrost grubości szczeliny powietrznej jest zdecydowanie bardziej niekorzystny przy uzwojeniu bieżnika wykonanym ze stali.

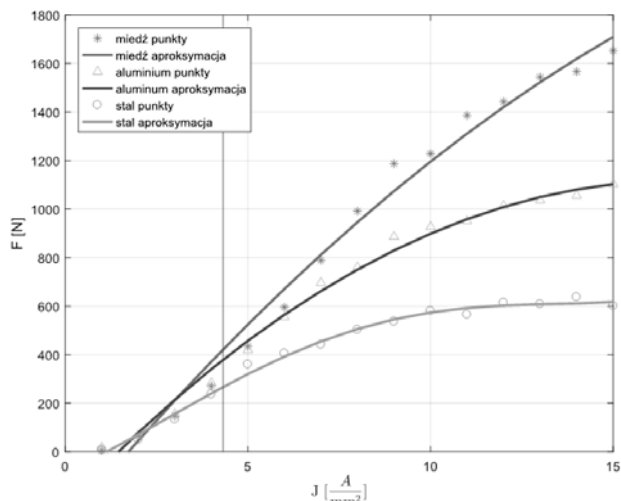


Rys. 5. Model tubowy $F = f(\delta), j = const, \delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE} = const$



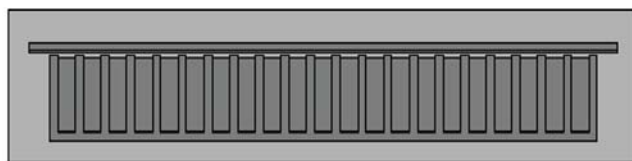
Rys. 6. Model tubowy $F = f(\delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE}), \delta = const, j = const$

Równie zaskakująca okazuje się charakterystyka siły ciągu w zależności od grubości ciarwarstwy przewodzącej bieźnika (rys. 6). W tym przypadku, gdy materiał uzwojenia będzie grubszy od ok. 1,5 mm, aluminium okazuje się lepsze, jednakże jeszcze lepszym byłoby zastosowanie uzwojenia miedzianego o grubość około 1 mm. Dla tej wartości grubości uzwojenia miedzianego charakterystyka posiada ekstremum. Ekstremum dla aluminium również występuje, jest ono przesunięte o ok. 0,25 mm, ale nie zapewnia takiej wartości siły jak miedz. W przypadku tej charakterystyki ciekawym byłoby zbadanie większych grubości cizwojeń aby stwierdzić czy faktycznie aluminium wciąż byłoby bardziej opłacalne od miedzi. Ogólny spadek wartości siły ciągu wraz ze wzrostem grubości cizwojenia zwartego miedzianego i aluminium powyżej wartości cizwojenia wynika ze zwiększania się szczeliny magnetycznej silnika. Uzwojenie stalowe w zbadanym zakresie nie posiada ekstremum i stopniowo, wraz ze wzrostem grubości cizwojenia na uzyskiwanie większych sił ciągu. Po przekroczeniu grubości cizwojenia wartość siły ciągu ok. 2 mm uzwojenie stalowe wykazuje lepsze właściwości niż aluminium czy miedz, co zdecydowanie upraszcza wybór materiału do budowy bieźnika, jeżeli projektowany silnik będzie pracował przy dużych wartościach cizwojenia. Charakterystyka wartości siły ciągu od wartości cizwojenia cizwojenia (rys. 7) przedstawia wyniki dość oczywiste. Wraz ze wzrostem wartości cizwojenia cizwojenia siła rośnie oraz materiał o lepszej przewodności zapewnia uzyskanie



Rys. 7. Model tubowy $F = f(j), \delta = const, \delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE} = const$

większej siły po przekroczeniu granicznej wartości gęstości cizwojenia płynącego w uzwojeniach. Dla bardzo małych gęstości cizwojenia lepsze właściwości wykazują materiały o mniejszej przewodności cizwojenia. Należy tu nadmienić że rozważane gęstości cizwojenia są w modelu polowym nieograniczone fizycznymi możliwościami cizwojenia ciepła przez maszynę. Dlatego choć w teoretycznym rozważaniu dla gęstości cizwojenia $15 A/mm^2$ można uzyskać wartość siły wynoszącą około 1700 N to w praktyce maszyna prawdopodobnie uległaby awarii w takich warunkach o ile jej konstrukcja nie zostałaby przystosowana do nich. Zauważalne jest również szybsze nasytanie się bieźnika w przypadku jednowarstwowej konstrukcji stalowej. Model pełnowymiarowy (rys. 8) od wariantu uproszczonego różni się właściwie liczbą cewek oraz zębów, odpowiednio 21 i 22. Z tymi liczbami związane są również długość cizwojenia oraz uzwojenia i jarzma twornika. W przypadku twornika oba te elementy zostały nieco wydłużone, gdyż w rzeczywistości będą dłuższe niż sam wzbudnik. W tym wariantcie zrezygnowano również z symetrycznych warunków brzegowych, dzięki czemu w modelu występują efekty krańcowe.



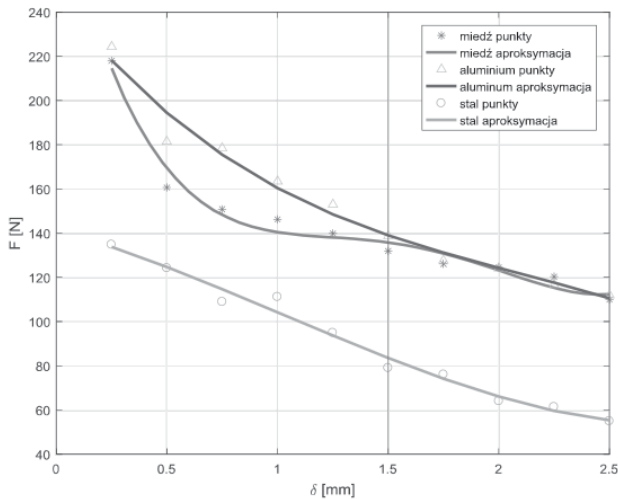
Rys. 8. Wariant pełnowymiarowy silnika tubowego

Wariant pełnowymiarowy jest modelem znacznie większym od uproszczonego. Wiąże się to z większą ilością elementów, przy zachowaniu takiej samej dyskretyzacji. Ponieważ skutkuje to dłuższym czasem rozwiązywania problemu w takiej sytuacji warto zastanowić się nad zwiększeniem rozmiaru elementów w obszarach, gdzie pole zmienia się najmniej.

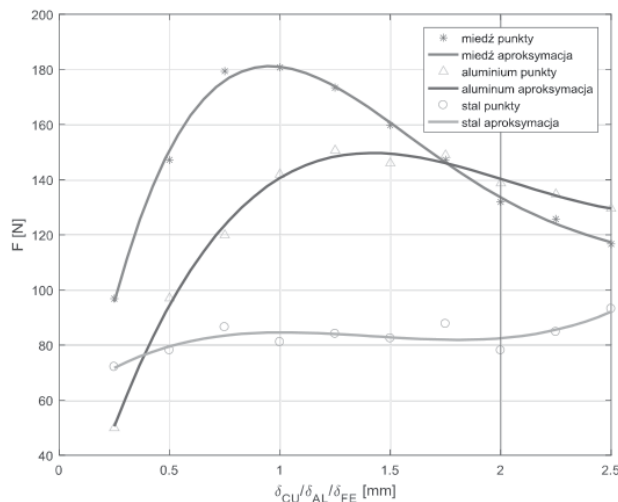
Dokonane obliczenia w modelu pełnowymiarowym wykazały siłę na poziomie 322 N. Siła w tym modelu była liczona według metody zalecanej w dokumentacji [4], a więc według metody pierwszej w modelu uproszczonym. Zwiększenie dokładności całkowania, analogicznie jak w modelu uproszczonym, prowadzi do zmniejszenia wartości siły i ustabilizowania jej wartości w okolicach 319 N. Obliczona wartość siły jest nieco niższa niż otrzymana w modelu uproszczonym co wprost wynika z obecności efektów krańcowych.

Model transformatorowy według przeprowadzonych ob-

liczeń zapewnia znacznie mniejszą wartość siły ciągu w odniesieniu do wersji tubowej. Zgodnie z charakterystykami ujętymi na rysunku 9 siła jest około dwukrotnie mniejsza, a wraz ze wzrostem szczeliny ta różnica jeszcze się pogłębia. Można tu zaobserwować również dosyć nieintuicyjną własność: lepszych wyników dla aluminiowego bieźnika pomimo tego, że siła w punkcie początkowym jest w zasadzie identyczna dla obu materiałów. Zastosowanie wyłącznie samego żelaza w tworniku może się okazać w topologii transformatorowej niewystarczające, szczególnie dla większych szczelin. W całym zakresie wykresy charakterystyki bieźnika ze stali generuje znacznie mniejsze wartości siły ciągu niż z miedzi czy aluminium.



Rys. 9. Model transformatorowy $F = f(\delta), j = \text{const}, \delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE} = \text{const}$

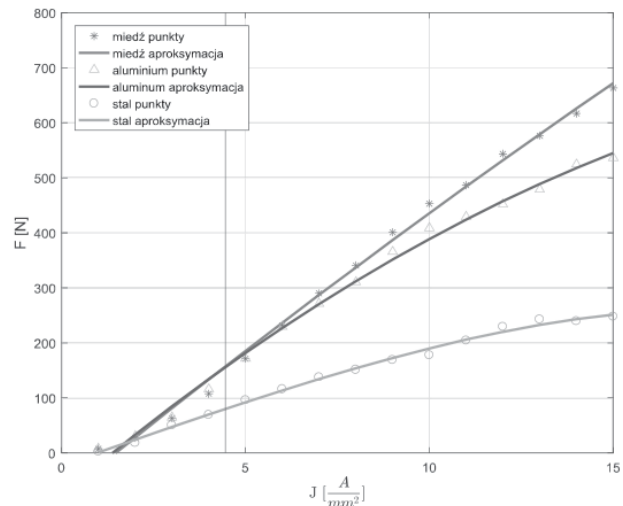


Rys. 10. Model transformatorowy $F = f(\delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE}), \delta = \text{const}, j = \text{const}$

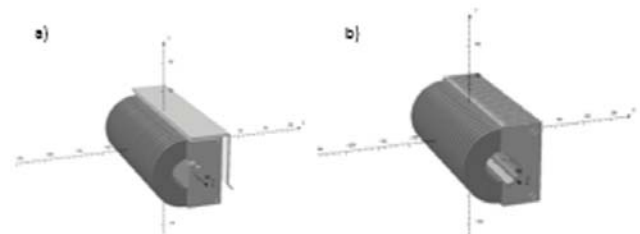
Kształty charakterystyk siły w zależności od grubości ciod uzwojenia twornika w modelu transformatorowym (rys. 10.) w przypadku miedzi i aluminium przypominają charakterystyki wykresu łonęła silnika tubowego. Zauważalna jest również identyczna zależność od grubości cioda jego ekstremum, także w okolicach wartości ciodowej 1 mm. Punkt zmiany opłacalności materiału występuje w analogicznym miejscu jak w modelu tubowym pełnym. Niestety otwarty obwód magnetyczny występujący w tej maszynie praktycznie skręcała zastosowanie wyłącznie stali w bieźniku. Nie tylko zapewnia znacznie mniejsze wartości siły ciągu, lecz również w takim

modelu obserwuje się dużo większe siły naciągu magnetycznego, które w przypadku tej geometrii nie będą kompensowane.

Charakterystyki siły w funkcji gęstości cieżądu (rys. 11) wykazują identyczną tendencję jak w silniku tubowym, jednakże, jak można się spodziewać, znacząco ustępują pod względem wynikowej siły. Szczególnie mały zysk na wzrost cieżartości siły, przy zwiększaniu wartości cieżądu zasilającego uzwojenia silnika, występuje przy stosowaniu wyłącznie stali w tworniku. Jest on wprawdzie tak samo, jak przy innych materiałach stosowanych, około dwukrotnie niższy niż w silniku tubowym, jednak stosowanie takiego materiału przy takich warunkach zasilania wymagałoby szczególnego uzasadnienia.



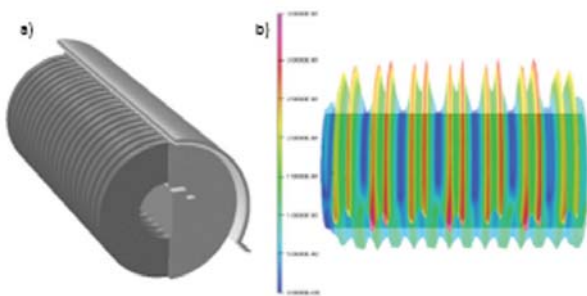
Rys. 11. Model transformatorowy $F = f(j), \delta = \text{const}, \delta_{CU}/\delta_{AL}/\delta_{FE} = \text{const}$



Rys. 12. Modelowane fragmenty a) modelu transformatorowego, b) modelu tubowego

Model trójwymiarowy wykonano wyłącznie w wariancie pełnym, ponieważ jego celem było uzyskanie najbardziej wiarygodnych wyników. Zdecydowano się na zastosowanie symetrycznego warunku brzegowego względem osi OZ. Warunek ten określa, że składowa normalna indukcji na granicy jest równa zero. Dzięki temu efekt krańcowy został zachowany w modelu, a dyskretyzacja modelu można zagęścić. Modele w trakcie tworzenia były stopniowo ulepszone poprzez lokalną kontrolę błędów obliczeniowych, np. różnicę pomiędzy polem usrednionym węzła, a polem obliczonym, którą można zobaczyć na wygenerowanej mapie w programie Opera po rozwiązaniu modelu. Tym samym każdorazowo po uzyskaniu rozwiązania przystępowano do jego analizy i poprawiano dyskretyzację w istotnych miejscach. Należy pamiętać, że błąd wskazywany przez program nie jest związany z amplitudą pola. Jest on związany z pochodną, a zatem z miarą szybkości zmian pola. Dlatego w miejscach z dużymi zmianami pola należy zagęścić siatkę.

Ponieważ, jak wcześnie wspomniano, ze względu na konieczność cdażenia do upraszczania modelu, siatkę tworzą według następującej metodyki: gęsta w miejscach dużych zmian pola uczestniczących w wytwarzaniu siły, rzadka w miejscach, gdzie pole nie uczestniczy w generowaniu siły ciągu. Ogólny błąd określony przez program po zakończeniu obliczeń jest mało istotny, gdyż najczęściej występował on w miejscach w których dyskretyzacja była przeprowadzona mało dokładnie – czyli miejscach nieistotnych z punktu widzenia poprawności działania maszyny, co zupełnie nie wpływa na jakość rozwiązania. Wykonano trójwymiarowy model silnika transformatorowego, o wymiarach analogicznych jak w rzeczywistym zbudowanym silniku transformatorowym, ale z okrągłymi zębami i bieźnikiem co skutkuje zwiększeniem szczeliny aktywnej takiego silnika. Jest to niewątpliwie lepsza konstrukcja silnika transformatorowego, gdyż pozwala zmniejszyć ilość zużywanego materiału i eliminuje niepotrzebną odległość uzwojeń i bieźnika w rogach zębów.

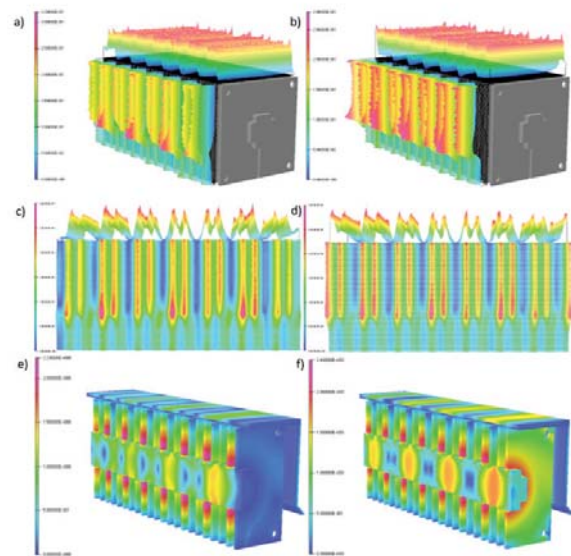


Rys. 13. Model transformatorowy okrągły, a) modelowany fragment, b) indukcja w szczelinie dla kąta fazowego 0°

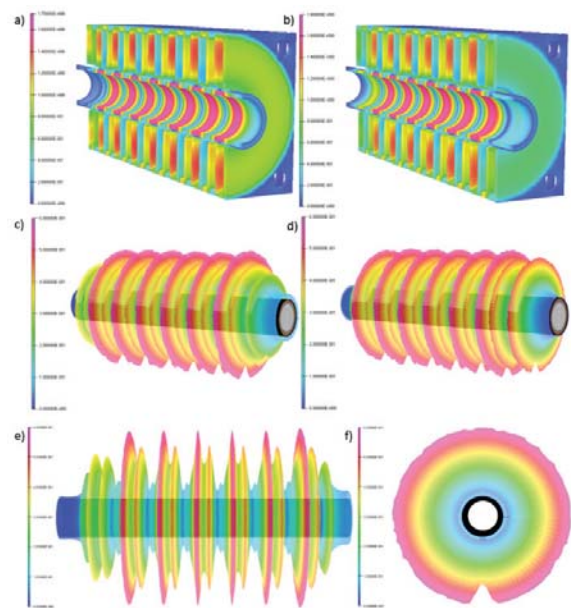
Po rozwiązaniu modeli wykresiono w oprogramowaniu Opera 3d rozkład indukcji w szczelinie oraz indukcję w elementach silników. Model transformatorowy został przedstawiony na rysunku 12 a), model tubowy na rysunku 12 b) zaś model transformatorowy okrągły na rysunku 13. Rysunki 14 a), b), c) i d) przedstawiają zjawisko znacznej zmiany indukcji w miejscu końców kabieźnika w silniku transformatorowym. Zjawisko to zwane jest efektem brzegowym. Na rysunku 14 c) i d) dobrze widoczne są lokalne maksima i minima indukcji w szczelinie. Maksima występują nad zębami wzbudnika zaś minima nad żłobkami.

Na rysunkach 15 c), d), e) i f) widoczny jest wpływ kształtu konstrukcji wzbudnika silnika tubowego na wartość indukcji w szczelinie. Charakterystyczne wycięcie w blachach wzbudnika powoduje lokalne zmniejszenie wartości indukcji dobrze widoczne na rysunku 15 f). Na rysunkach 13, 14, 15 widoczne jest zjawisko zwane efektem krańcowym, objawiające się niesymetrycznym rozkładem indukcji w szczelinie – jej wartość z jednej strony silnika są wyższe niż z drugiej. Tak samo jak w silniku transformatorowym zauważalne są maksima nad zębami, a minima nad żłobkami. Wyniki obliczeń wykazały podobne wartości siły jak w przypadku modeli dwuwymiarowych. Wartość siły ciągu jest nieco niższa w modelu trójwymiarowym. Takie rozbieżności wynikają z uwzględnienia dodatkowych elementów geometrii obwodu magnetycznego takich jak kwadratowy kształt blach zębów, nacięcia blach i jarzma mające wyeliminować prądy wirowe, czy otwory na pręty utrzymujące całość csilników. Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla prądu fazowego o wartości 10 A przedstawiono w tabelicy 3. Obliczenia siły zostały wykonane dwiema metodami, pierwsza to całka objętościowa, druga to obliczenie tensora naprężeń Maxwella

na powierzchni elementu. Obie metody wykazały prawie takie same wyniki.



Rys. 14. Model transformatorowy, a) moduł indukcji w szczelinie dla kąta fazowego 0°, b) moduł indukcji w szczelinie dla kąta fazowego 60°, c) moduł indukcji w szczelinie, widziany od boku silnika dla kąta fazowego 0°, d) moduł indukcji w szczelinie, widziany od boku silnika, dla kąta fazowego 60°, e) indukcja w elementach silnika dla kąta fazowego 0°, f) indukcja w elementach silnika dla kąta fazowego 60°



Rys. 15. Model tubowy, a) moduł indukcji w elementach silnika dla kąta fazowego 0°, b) moduł indukcji w elementach silnika dla kąta fazowego 120° c) moduł indukcji w szczelinie dla kąta fazowego 0°, d) moduł indukcji w szczelinie dla kąta fazowego 120°, e) moduł indukcji w szczelinie widziany z boku silnika dla kąta fazowego 0°, f) moduł indukcji w szczelinie widziany z boku silnika dla kąta fazowego 0°

W przypadku analizy rozkładu indukcji w szczelinie silnika transformatorowego w wersji okrągłej zauważalne są analogiczne zjawiska jak w pierwotnej wersji tj. z kwadratowymi blachami zębów. Otrzymane wyniki podkreślają jak ważne jest dążenie do zwiększania szczeliny aktywnej silnika. W tej konstrukcji siła ciągu nie tylko znacznie przewyższa tę uzyskiwaną przez zbudowany silnik transformatorowy, ale również wyraźnie zbliża się do wyników uzyskanych

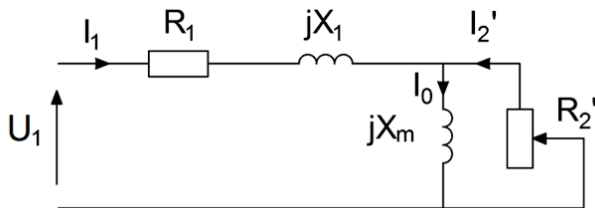
w modelu trójwymiarowym silnika tubowego. Bezpoś rednio porównując wartość csił ciągu modeli trójwymiarowych widać wyraż niewiększą gęstość mocy silnika tubowego przy takich samych warunkach pracy, czyli takich samych prądach płynących w uzwojeniu.

Tabela 3. Obliczone wartości csił ciągu w przypadku zastosowania modeli trójwymiarowych silnika transformatorowego, transformatorowego okrągłego i tubowego.

	Transformatorowy	Transformatorowy okrągły	Tubowy
	F [N]	F [N]	F [N]
całka objętość ciowa	200	277,9	311,1
tensor naprężeń Maxwella na powierzchni	202,7	284,5	310,6

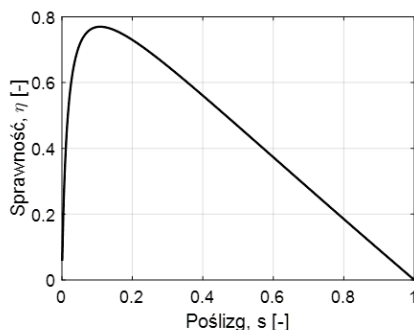
Analityczne wyznaczenie parametrów schematu zastępczego oraz eksploatacyjnych silnika tubowego

Literatura techniczna z zakresu analizy silników indukcyjnych liniowych [5], [6], [7], [2] przedstawia metodykę wyznaczania przewidywanych parametrów eksploatacyjnych tych silników na podstawie wartości elementów schematu zastępczego. Uproszczony schemat zastępczy silnika indukcyjnego liniowego tubowego przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Uproszczony schemat zastępczy silnika indukcyjnego liniowego [5]

W celu porównania wyników badań przeprowadzonych na silniku oraz komputerowych symulacji opartych na metodzie elementów skończonych różnymi metodami analitycznymi, przeanalizowano zawarte w publikacjach procedury pozwalające na podstawie parametrów mechanicznych i elektrycznych określić możliwości do osiągnięcia siły ciągu. Otrzymane w wyniku obliczeń charakterystyki przedstawiono na poniższych wykresach (rys. 17, 18, 19, 20).



Rys. 17. Sprawność w funkcji poślizgu przy stałym prądzie zasilania wzbudnika. Metoda [5]

Krytycznie podsumowując znaczne rozbieżności pomiędzy otrzymanymi wynikami badań oraz obliczeń należy wskazać m.in. na następujące przyczyny tych różnic:

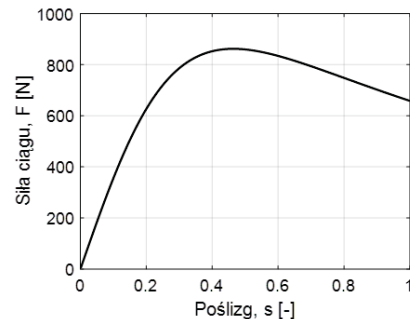
1. niewłaściwe odwzorowanie pakietowanej geometrii wzbudnika przez wzory analityczne,

2. pominięcie istotnych zjawisk np. krańcowych wyższych harmonicznych strumienia magnetycznego,

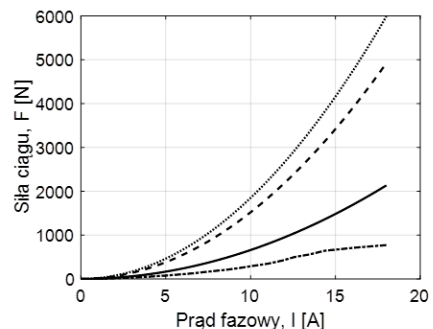
3. niedokładne odwzorowanie współczynników i parametrów materiałowych,

4. relatywnie duża wartość szczeliny magnetycznej w stosunku do szerokości czołobka,

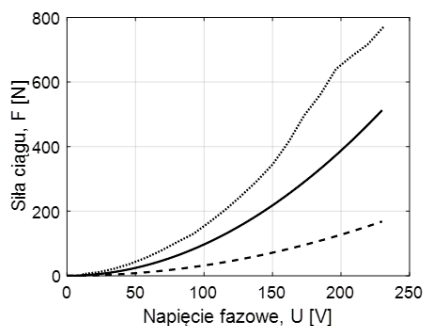
5. uproszczony schemat zastępczy silnika indukcyjnego liniowego.



Rys. 18. Siła ciągu w funkcji poślizgu przy stałym prądzie zasilania wzbudnika. Metoda [5]



Rys. 19. Siła ciągu w funkcji prądu fazowego przy poślizgu równym 1. Wykres parametryzowany metodą obliczeń. Linia kropkowana: metoda [6] dla silnika płaskiego; linia kreskowana: metoda [6] dla silnika tubowego; linia ciągła: metoda [5]; linia kropka-kreska: wyniki pomiarów



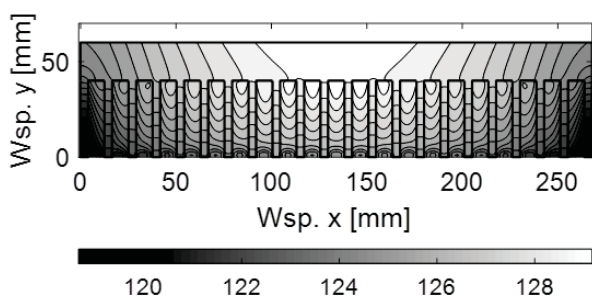
Rys. 20. Siła ciągu w funkcji napięcia fazowego przy poślizgu równym 1. Wykres parametryzowany metodą obliczeń. Linia kropkowana: wyniki pomiarów; linia ciągła: metoda [7] dla parametrów schematu zastępczego uzyskanych dzięki metodzie [6]; linia kreskowana: metoda [7] dla parametrów schematu zastępczego uzyskanych dzięki metodzie [6]

Analiza cieplna silnika liniowego transformatorowego i tubowego

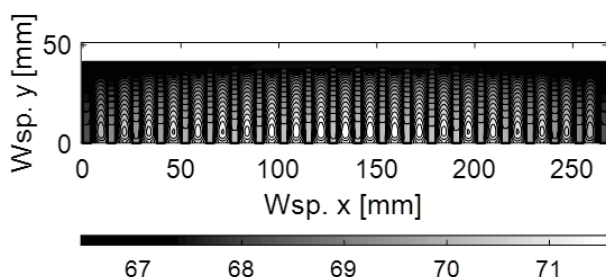
Zagadnienia cieplne przysparzają wiele problemów w procesie rozważań, a to głównie za sprawą skomplikowanych, przeplatających się struktur fizycznych o różnych wartościach przewodności cieplnej oraz współczynników oddawania ciepła i grubości poszczególnych warstw. Chęć

wzięcia pod uwagę jak największej ilości rodzajów przekazywania ciepła sprawia, że obliczenia znacząco rozrastają się. W tym kontekście ciepłą przewagą nad metodą elementów skończonych czonych stanowią metody zastępczych sieci cieplnych. Cechuje się ona bowiem znacznie mniejszym skomplikowaniem algorytmu symulacyjnego przy porównywalnej dokładności odwzorowania geometrii, materiałów składowych oraz wyników. Wadą tej metody jest natomiast wynikająca z zalety, ograniczona liczba punktów obliczeniowych, która powoduje, że metoda nie nadaje się do wyznaczania ciągłego rozkładu temperatur. W przypadku analizy cieplnej, otrzymanie zadowalających wyników obarczone jest koniecznością wykonania szeregu eksperymentów bądź obliczeń, polegających na wyznaczeniu parametrów fizycznych materiałów, które wchodzi w skład symulowanej maszyny [8], [9], [10], [11].

W pracy podjęto próbę wyznaczenia map cieplnych wykonanych silników liniowych. Zdecydowano do tego celu zastosować metodę sieci cieplnych, która wykorzystuje analogie opisów matematycznych zjawisk związanych z przepływem prądu, do opisów strumieni ciepła. Odpowiednikiem prądu elektrycznego jest w tym wypadku przepływ strumienia ciepła, zaś zamiast potencjałów, operuje się na różnicach temperaturach poszczególnych ciał lub fragmentów tych ciał. W teorii możliwe jest przyporządkowanie na schemacie cieplnym węzła każdemu elementowi maszyny (dowolnej wielkości z dowolnego materiału), przy czym na dokładność symulacji będzie miał wpływ stopień uszczegółowienia modelu. Wykonane obliczenia odnoszą się do stanu cieplnie ustalonego. Przeprowadzono je przy założeniu, że ilość energii w postaci ciepła transportowanego do otoczenia jest równa stratom w silniku, ponieważ w stanie ustalonym maszyna osiąga taką temperaturę, dla której ilość energii cieplnej wydzielanej do powietrza jest taka sama jak ilość energii cieplnej w niej wytwarzanej.



Rys. 21. Mapa temperatur wykres łonana przekroju wzdłużnym silnika transformatorowego w stanie cieplnie ustalonym dla prądu fazowego $I = 3 \text{ A}$



Rys. 22. Mapa temperatur wykres łonana przekroju wzdłużnym silnika tubowego w stanie cieplnie ustalonym dla prądu fazowego $I = 5 \text{ A}$

Mechanizmami wymiany ciepła uwzględnionymi w rozważaniach są: przewodzenie zachodzące w ciałach stałych (stali i uzwojeniu) oraz konwekcja naturalna i wymuszona odpowiadająca ruchowi mas powietrza. Promieniowanie cieplne, będące trzecim mechanizmem wymiany, z uwagi na znikomy - w dziedzinie maszyn elektrycznych - wpływ, zostało pominięte.

Otrzymane w wyniku symulacji rozkłady temperatur przedstawiono na rysunkach 21 i 22. Uzyskano rozkłady temperatur odpowiadające wykonanym pomiarom, jednak należy pamiętać że przeprowadzenie wystarczająco dokładnych badań temperatur wymagałoby zastosowania, jak już zostało wspomniane, znacznie większej ilości punktów pomiarowych i testów. Dopiero wtedy można by z dużą pewnością przesądzić o idealnym odwzorowaniu metodami komputerowymi.

Autorzy: Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, e-mail: gkamiński@ime.pw.edu.pl, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, 00-660 Warszawa Pl. Politechniki 1, mgr inż. Łukasz Ordyszewski, e-mail: lukasz.ordyszewski@ee.pw.edu.pl, mgr inż. Karol Ciesielski, e-mail: karolc3a@gmail.com

LITERATURA

- [1] Kamiński G., Przyborowski W., Staszewski P., Kupiec E.: Rozdział 6. Silniki elektryczne liniowe w napędach PRT, 6.1, Szczygiół J., Biernat A., Jakubowski R.: Rozdział 11.9, Badania maszyny elektrycznej Ekomobilność Tom I, Innowacyjne i ekologiczne środki transportu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2015.
- [2] Gieras J.: Silniki indukcyjne liniowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990.
- [3] Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W.: Laboratorium maszyn elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [4] OPERA-2d User Guide, Vector Fields Limited, Oxford 2004.
- [5] Boldea I., Nasar S. A.: Linear Motion Electric Machines, Wiley, Michigan 1976.
- [6] Boldea I., Nasar S. A.: The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2002.
- [7] Budig P. K.: Drehstromlinearmotoren, VEB Verlag Technik, Berlin 1978.
- [8] Mynarek P.: Analiza stanów cieplnych w silnikach małej mocy, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole 2014.
- [9] Mynarek P., Kowol M., Łukaniszyn M.: Modelowanie, analiza i weryfikacja zjawisk cieplnych na przykładzie 3-fazowego silnika indukcyjnego, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław 2012.
- [10] Krok R.: Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [11] Kozłowski H. S., Turowski E.: Silniki indukcyjne. Projektowanie, Konstruowanie, Wytwarzanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1961.
- [12] Rogalski A.: Wybrane charakterystyki silnika indukcyjnego liniowego, Przegląd Elektrotechniczny, r. 93 nr 2/2017, Warszawa 2017.