

Mariusz BARAŃSKI*, Krystian GLAPA

MODELOWANIE TRÓJWYMIAROWEGO ROZKŁADU POLA TEMPERATURY W ELEKTROMAGNETYCZNYM UKŁADZIE CHWYTNYM Z WYKORZYSTANIEM ŚRODOWISKA COMSOL

W artykule przedstawiono opracowany w środowisku Comsol trójwymiarowy polowy model elektromagnetycznego układu chwytanego do analizy rozkładu pola temperaturowego. Wykorzystany w pracy elektromagnetyczny układ chwytany, stanowiący składową kończynę dwunożnego robota krocącego, został zaprojektowany przez autorów. Przedstawiono algorytm obliczeń analitycznych elektromagnesu oraz proces modelowania rozkładu pola cieplnego w środowisku Comsol. Przeprowadzono obliczenia symulacyjne, w trakcie których analizowano wpływ prądu zasilającego cewkę elektromagnesu oraz szerokości szczeliny powietrznej na rozkład pola temperaturowego w stanie cieplnie ustalonym. Zaprezentowano wybrane rezultaty badań symulacyjnych oraz wynikające z nich wnioski.

SŁOWA KLUCZOWE: elektromagnetyczny układ chwytany, ujęcie 3D, zjawiska cieplne, oprogramowanie Comsol.

1. WPROWADZENIE

Urządzenia chwytne są obecnie najbardziej zróżnicowanymi konstrukcyjnie elementami robotów i manipulatorów. Wynika to z ich coraz powszechniejszego użycia w wielu gałęziach przemysłu i różnorodności manipulowanych obiektów. Jednym z popularnych rozwiązań są chwytaki elektromagnetyczne, umożliwiające przenoszenie obiektów z materiałów ferromagnetycznych. Znajdują one zastosowanie zarówno w układach manipulacyjnych, jak również w układach krocących robotów mobilnych, poruszających się po powierzchniach charakteryzujących się właściwościami ferromagnetycznych [1, 2, 3, 4]. Najważniejszym ich zadaniem jest wytworzenie odpowiedniej siły przyciągania pomiędzy układem chwytym, a powierzchnią. Obecnie w konstrukcji wielu przetworników elektromagnetycznych poszukuje się nowych materiałów, w tym materiałów, które będą lepiej odprowadzać ciepło [5]. Zastosowanie takich materiałów umożliwi uzyskanie tych samych parametrów znamionowych przy

* Politechnika Poznańska

znacznie mniejszych gabarytach urządzenia [3]. Uzyskuje się wówczas układ o większej gęstości mocy.

W celu jak najdokładniejszego odwzorowania zjawisk zachodzących w przetwornikach elektromagnetycznych, przeprowadza się analizy komputerowe obejmujące również zagadnienia przepływu ciepła [9, 10]. Obecnie, do analizy zjawisk termicznych stosuje się modelowanie komputerowe. Pozwala to na ocenę cieplną maszyny już na etapie jej projektowania, a co się z tym wiąże, ogranicza do minimum konieczność budowania wielu kosztownych prototypów. Najpopularniejsze programy służące do analizy numerycznej modeli, takie jak ANSYS i COMSOL Multiphysics, wykorzystują metodę elementów skończonych (MES) do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych [6, 7].

2. ALGORYTM PROJEKTOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO UKŁADU CHWYTNEGO

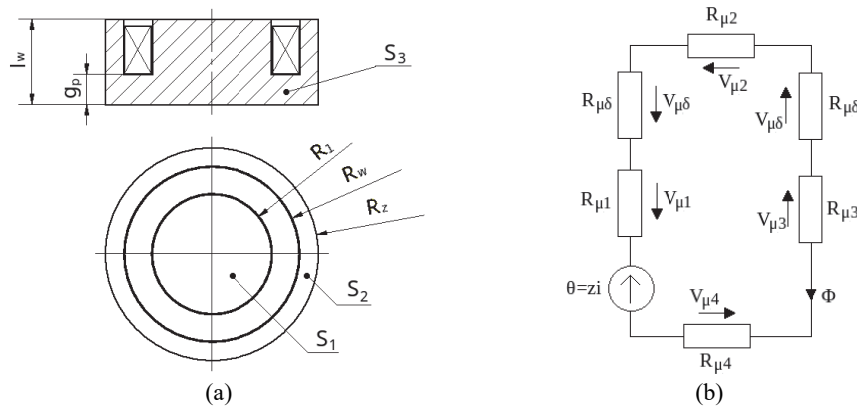
Na podstawie przeglądu literaturowego przeprowadzonego przez autorów przyjęto, że projektowany elektromagnes będzie stanowić element kończyny mobilnego robota wspinaczkowego tzw. element pedipulatora. Założono, że projektowany obiekt może być zastosowany w robocie kroczącym posiadającym dwie kończyny. W każdej z kończyn znajdował się będzie jeden elektromagnes. Biorąc pod uwagę, że podczas ruchu robota zaistnieje sytuacja, że tylko jedna noga robota będzie stykać się z powierzchnią, każdy z elektromagnesów musi być w stanie wytworzyć siłę przyciągania zdolną utrzymać całą masę konstrukcji. Przedstawione w literaturze informacje wskazują, że najcięższe z konstruowanych obecnie robotów wspinaczkowych mają masę własną około 100 kg [8]. Dodatkowo mogą one przenosić ze sobą do 60 kg ekwipunku niezbędnego do realizacji stawianych im zadań. Siła grawitacji działająca na układ wynosi więc około 1600 N. W celu zapewnienia bezpiecznej pracy np. przy napotkaniu przez robota krzywizny, niejednorodnego materiału ściany lub w przypadku zwiększonej szczeliny powietrznej należy założyć tzw. współczynnik bezpieczeństwa. Autorzy przyjęli, że wartość tego współczynnika będzie równa $x = 2$. A zatem, postulowana siła przyciągania jednego elektromagnesu wynosić będzie $F = 3200$ N, przy szczelinie roboczej równej $\delta = 0,2$ mm.

Na rysunku 1a przedstawiono oznaczenia wymiarów geometrycznych zaprojektowanego przez autorów osiowosymetrycznego elektromagnetycznego układu chwytne. Jego schemat zastępczy obwodu magnetycznego pokazano na rysunku 1b.

Na podstawie przeprowadzonych studiów dotyczących obecnych trendów w projektowaniu i opracowywaniu nowych konstrukcji elektromagnesów chwytnych, do dalszych obliczeń przyjęto następujące dane:

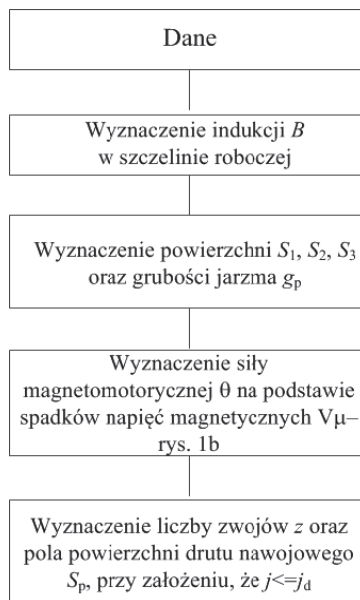
- postulowana siła przyciągania $F = 3200$ N,
- szczelina robocza $\delta = 0,0002$ m, dla której uzyskuje się siłę F ,

- promień wewnętrzny $R_1 = 0,028$ m,
- promień zewnętrzny $R_z = 0,050$ m,
- wysokość walca $l_w = 0,026$ m,
- dopuszczalna gęstość prądu $j_d = 5$ A/mm²,
- znamionowe napięcie zasilania $U_{DC} = 24$ V.



Rys.1. Oznaczenia wymiarów geometrycznych elektromagnesu osiowosymetrycznego (a) oraz schemat zastępczy jego obwodu magnetycznego (b)

Na rysunku 2 przedstawiono algorytm projektowania obwodu magnetycznego oraz elektrycznego elektromagnetycznego układu chwytowego.



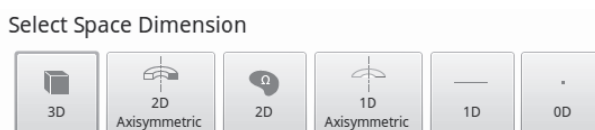
Rys. 2. Algorytm projektowania elektromagnetycznego układu chwytowego

3. PROCES MODELOWANIA NUMERYCZNEGO POLA TEMPERATUROWEGO W COMSOL

Oprogramowanie COMSOL Multiphysics jest złożonym interaktywnym narzędziem inżynierskim, które pozwala na modelowanie i rozwiązywanie różnego rodzaju problemów technicznych i naukowych [6]. Wykorzystuje ono do analizy numerycznej równania różniczkowe cząstkowe (ang. *Partial Differential Equations*), które są rozwiązywane przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych (MES) [7]. Równania takie są podstawą opisu większości praw fizyki, dzięki czemu narzędzie COMSOL pozwala na analizę modelu w wielu dziedzinach nauki. Są to między innymi: akustyka, zagadnienia elektromagnetyczne, dynamika płynów, elektrochemia, geofizyka, wymiana ciepła, mikroelektromechanika (MMES), optyka, mechanika klasyczna i kwantowa.

Proces modelowania chwytaka magnetycznego

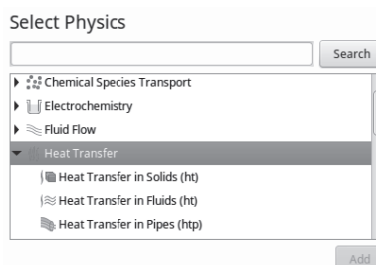
Po uruchomieniu programu należy wybrać w jakim układzie przestrzennym modelowany będzie przetwornik. Do wyboru użytkownika są układy przestrzenne jedno, dwu, lub trójwymiarowe. Widok okna wyboru przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wybór układu przestrzennego

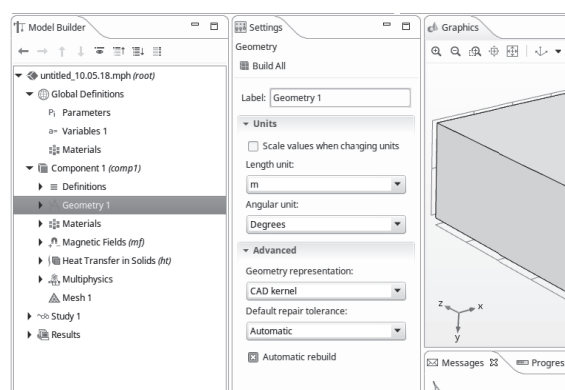
Przy modelowaniu obiektów trójwymiarowych o symetrii osiowej można wybrać analizę „2D axisymmetric”, co znacząco przyspieszy proces obliczeniowy. W pracy, z uwagi na charakter powierzchni styku z elektromagnesem, wybrano pełną analizę 3D.

Kolejnym etapem jest wybór modułu zjawisk, tzw. *Physics*, z bazy programu – rys. 4. W przypadku analizowanego obiektu wybrano moduły „AC/DC” (zjawiska elektromagnetyczne), „Heat Transfer” (przepływ ciepła) oraz „Multi-physics” (zjawiska sprzężone).



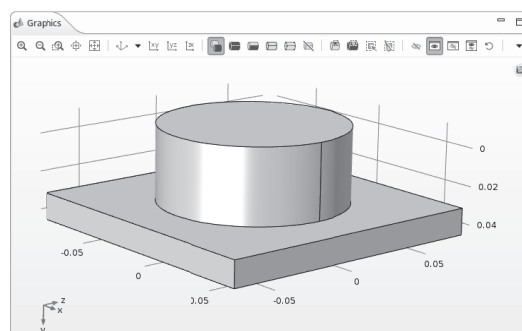
Rys. 4. Okno wyboru modułów analizowanych zjawisk fizycznych

Po zaakceptowaniu wyboru uruchamia się okno główne interfejsu, przedstawione na rys. 5. Po lewej stronie znajduje się okno drabinkowe „*Model Builder*”, które wyświetla kolejne procedury do realizacji. W środkowej kolumnie znajduje się okno ustawień „*Settings*”, w którym wprowadza się wszystkie niezbędne parametry. Ostatnie okno „*Graphics*”, m.in. wyświetla w formie graficznej rozpatrywany układ, który zbudowany jest z tzw. domen.



Rys. 5. Okno główne programu

Zakładka „*Geometry*” umożliwia rysowanie struktur modeli w dwóch lub trzech wymiarach przy użyciu komponentów oferowanych przez środowisko Comsol. Niestety dla geometrii o skomplikowanej strukturze budowanie struktury bezpośrednio w środowisku jest czasochłonne. Dlatego też, wygodnym rozwiązaniem jest import geometrii rozpatrywanego układu. Na rys. 6 pokazano zaimportowany układ elektromagnesu z fragmentem powierzchni podłoża.

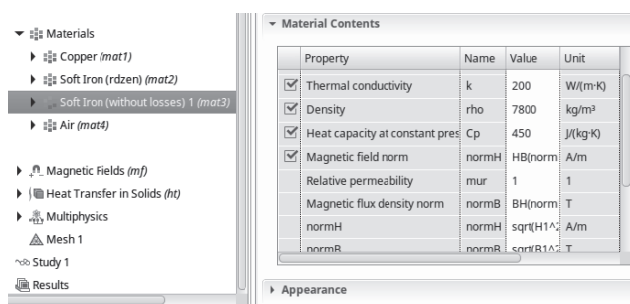


Rys. 6. Zaimportowany model rozpatrywanego układu

Przeprowadzając analizę rozkładu temperatur w badanym obiekcie należy utworzyć dodatkową geometrię otaczającą dany obiekt. Geometria ta musi po-

siadać właściwości fizyczne medium otaczającego badany układ. W naszym przypadku jest to powietrze o temperaturze 20 °C.

W celu przypisania danej domenie właściwości materiałowych korzysta się z komponentu „Materials”. Komponent ten zawiera bogatą bibliotekę materiałów i pozwala przypisać każdemu podzespołowi rozpatrywanego elektromagnesu odpowiedni materiał. Komponent ten umożliwia także edycję parametrów materiałowych. Okno wprowadzania właściwości materiałów przedstawia rys. 7.

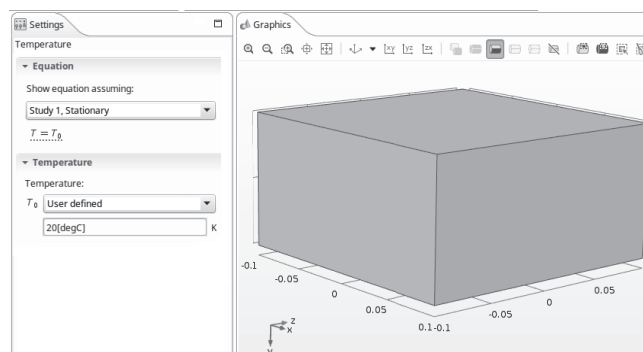


Rys. 7. Dodawanie i edycja parametrów materiałów

Podczas projektowania elektromagnetycznego układu chwytanego założono, że obwód magnetyczny wykonany jest ze stali St3. Dlatego konieczne było wprowadzenie do opracowywanego modelu charakterystyki magnesowania stali St3 i przypisania jej do rdzenia obiektu.

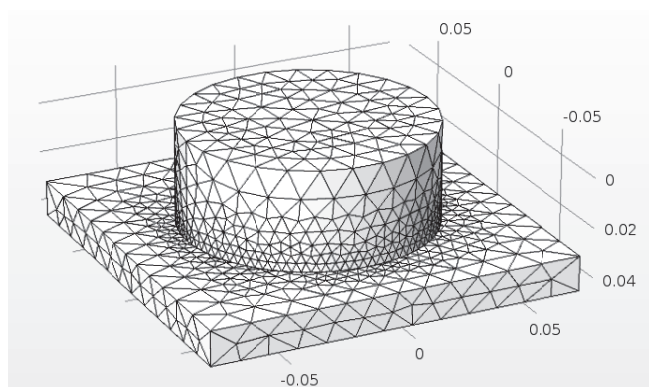
Przeprowadzając analizę rozkładu pola temperaturowego w przetworniku elektromagnetycznym należy w modelu przypisać źródła mocy. Źródłem mocy w rozpatrywanym elektromagnecie są: straty mocy generowane przez prąd płynący w uzwojeniu oraz straty mocy w rdzeniu. Źródła te możemy zadać bezpośrednio w procedurze *Heat Transfer in Solid* i przypisać do domen. Możemy je wyznaczyć przeprowadzając obliczenia elektromagnetyczne, procedura *Magnetic Field*, badanego układu i w następnym kroku obliczeniowym będą one pobrane do obliczeń pola temperaturowego. W takim przypadku mamy do czynienia z obliczaniem zarówno pola elektromagnetycznego i temperaturowego czyli ze zjawiskiem sprzężonym. Takie ujęcie zastosowano w pracy.

Warunek brzegowy I rodzaju dla pola temperaturowego definiuj się w zakładce „Heat transfer” przypisując wartość temperatury otoczenia dla ścian zewnętrznych obszaru zajmowanego przez powietrze – rys. 8.



Rys. 8. Warunek brzegowy dla ścian zewnętrznych

Komponent „Mesh” pozwala podzielić obszar modelu na skończoną liczbę elementów tworzących siatkę dyskretyzacyjną. Do wyboru jest 9 rozmiarów siatki generowanej automatycznie przez oprogramowanie, w której wielkość elementów jest zależna od geometrii oraz zamodelowanych wcześniej zjawisk fizycznych. Istnieje także możliwość lokalnej kontroli siatki ze strony użytkownika. W tym przypadku geometria została zdyskretyzowana przez siatkę elementów czworobocznych, która została automatycznie zagęszczona w szczelinie powietrznej, na powierzchni styku z podłożem oraz na uzwojeniu elektromagnesu, co przedstawiono na rys. 9.



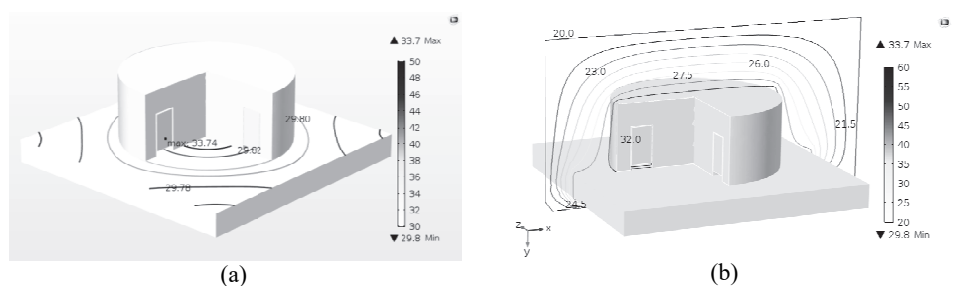
Rys. 9. Widok badanego układu z siatka dyskretyzującą

Aby można było przeprowadzić parametryczną analizę modelu zależną od prądu płynącego w uzwojeniu oraz grubości szczeliny powietrznej między elektromagnesem i chwytaną powierzchnią, w zakładce „Study” wybrano polecenie „Parametric Sweep”. W tym oknie zdefiniować można liczbę parametrów oraz ich zakres zmienności. Obliczenia uruchamia się przez wybranie polecenia „Compute”. Po ich zakończeniu wyniki przedstawiane są w formie graficznej

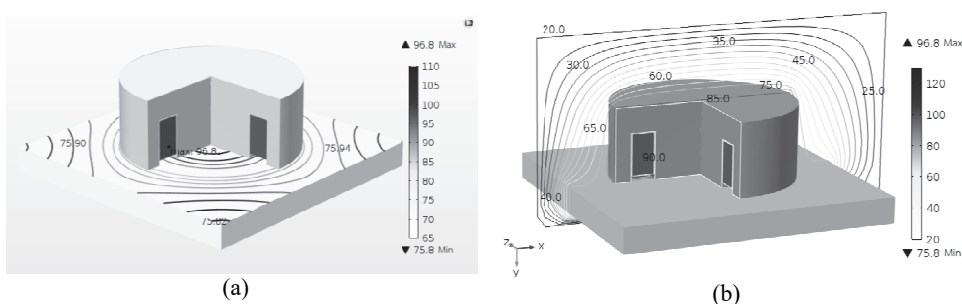
w zakładce „Results”. Ponadto, rezultaty obliczeń mogą zostać zapisane na dysku lub pamięci zewnętrznej w postaci zdjęć lub wyeksportowane do plików *.csv.

4. REZULTATY BADAŃ SYMULACYJNYCH

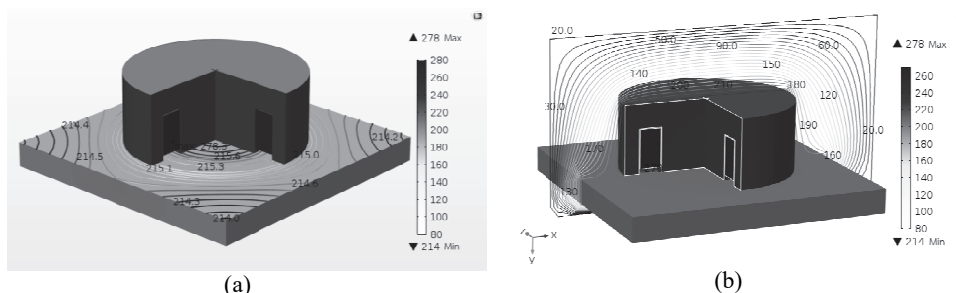
Na podstawie przedstawionego algorytmu projektowania elektromagnesu prądu stałego autorzy zaprojektowali osiowoosymetryczny elektromagnetyczny układ chwytny. W celu sprawdzenia poprawności zaprojektowanego elektromagnesu opracowano w środowisku Comsol Multiphysics połowy model cieplny. Model ten wykorzystano do analizy wpływu wartości prądu w cewce na rozkład pola temperaturowego. Elektromagnes zasilany był ze źródła prądu stałego napięciem o wartości 24 V, co odpowiada wartości znamionowej $I=0,494$ A prądu przepływającego przez jego uzwojenie. Wartość szczeliny powietrznej wynosi $\delta = 0,2$ mm. Badania przeprowadzono w stanie cieplne ustalonym. Na rysunkach 10-12 pokazano rozkłady pola temperaturowego wewnątrz elektromagnesu, na powierzchni podłoża oraz w powietrzu otaczającym badany obiekt dla trzech wartości prądu w cewce elektromagnesu 0,2, 0,494 i 1 A oraz przy założeniu, że $\delta = 0,2$ mm.



Rys. 10. Rozkład pola temperaturowego: (a) elektromagnesu i powierzchni podłoża, (b) otaczającego powietrza dla $I=0,2$ A

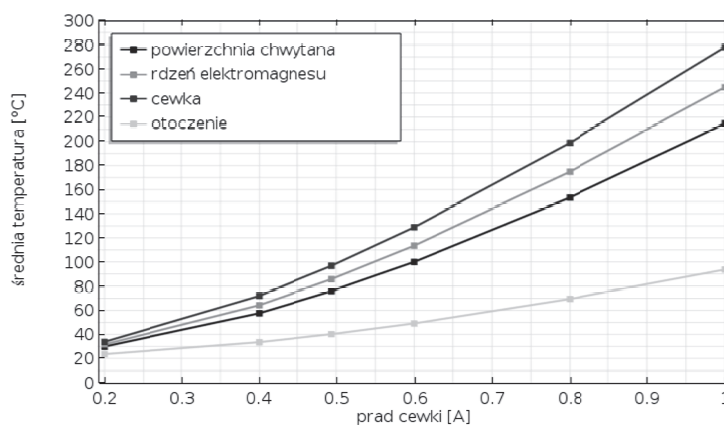


Rys. 11. Rozkład pola temperaturowego: (a) elektromagnesu i powierzchni podłoża, (b) otaczającego powietrza dla $I=I_N=0,494$ A



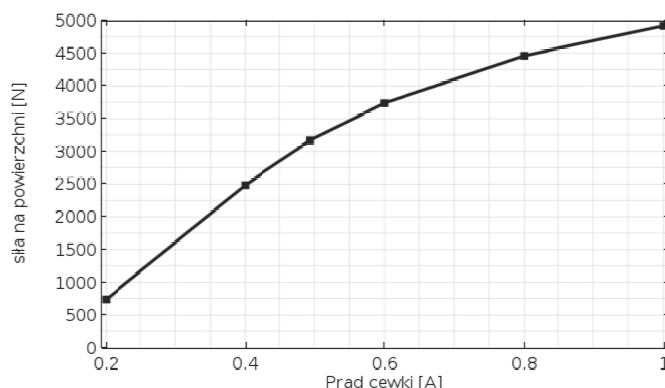
Rys. 12. Rozkład pola temperaturowego: (a) elektromagnesu i powierzchni podłoża, (b) otaczającego powietrza dla $I=1$ A

Na rys. 13 wykreślono średnie wartości temperatur podzespołów rozpatrywanego obiektu takich jak cewka, rdzeń i powierzchnia podłoża oraz powierzchni otoczenia w funkcji zmian wartości prądu zasilającego. Można zauważyć, że temperatura podzespołów elektromagnesu rośnie wraz ze wzrostem prądu. Najwyższa wartość temperatury jest w uzwojeniu, czyli tam, gdzie występują największe straty mocy



Rys. 13. Średnia temperatura podzespołów rozpatrywanego układu funkcji zmian prądu w cewce

Obliczoną wartość siły przyciągania w funkcji zmiany wartości prądu przy założeniu, że $\delta = 0,2$ mm przedstawiono na rys. 14. Otrzymana wartość siły przyciągania wzrasta wraz ze wzrostem prądu. Dla wartości znamionowej 0,494 A prądu siła przyciągania osiąga założoną w obliczeniach wartość 3200 N.



Rys. 14. Siła przyciągania w funkcji zmian wartości prądu w cewce

5. WNIOSKI

Dokonany na podstawie literatury przegląd magnetycznych urządzeń chwytanych pokazał ich różnorodność oraz szeroki zakres zastosowań w robotyce. W szczególności widoczne jest rosnące znaczenie chwytaków magnetycznych w robotach mobilnych mogących wspierać lub nawet zastępować człowieka przy wykonywaniu niebezpiecznych czynności. Dlatego coraz częściej dąży się do opracowywania nowych konstrukcji chwytaków elektromagnetycznych stanowiących części kończyn robotów koczających, pracujących w warunkach niebezpiecznych dla człowieka. W celu minimalizacji kosztów produkcji przeprowadza się analizy komputerowe wybranych stanów pracy projektowanych przetworników. Takie ujęcie zaproponowali autorzy w artykule.

Na podstawie przedstawionego algorytmu projektowania elektromagnesu prądu stałego, opracowano jego model polowy w środowisku COMSOL Multiphysics. Program umożliwia analizę zarówno zjawisk elektromagnetycznych, jak i cieplnych. Uzyskane wyniki symulacji w stanie cieplnie ustalonym wskazują na poprawność obliczeń projektowych i opracowanego modelu.

Zaobserwowano duży wpływ zmian wartości prądu w uzwojeniu elektromagnesu na rozkład pola temperaturowego w analizowanym chwytaku. Wraz ze wzrostem prądu rośnie temperatura wszystkich podzespołów elektromagnesu.

Przy zasilaniu chwytaka elektromagnetycznego prądem znamionowym temperatura cewki nie przekroczyła 98°C . Jest to wartość bezpieczna dla uzwojenia zaprojektowanego w klasie izolacji F (maksymalna dopuszczalna temperatura wynosi 155°C), nawet przy ciągłej, nieprzerwanej pracy przetwornika. Dla prądów większych niż znamionowy temperatura cewki w stanie ustalonym przekracza dopuszczalną wartość 155°C temperatury dla klasy izolacji F. Można zatem uznać, że zasilanie układu wartością prądu wyższą od znamionowej może doprowadzić do uszkodzeń przy pracy długotrwałej. Dla wartości prądu dwu-

krotnie większej od znamionowej uzyskano najwyższą wartość temperatury 278°C. Kształt krzywej opisującej zależność siły przyciągania od wartości prądu uzyskanej na podstawie obliczeń symulacyjnych jest bardzo zbliżony do krzywej przedstawianej w literaturze. Na podstawie wyników badań symulacyjnych otrzymano wartość siły przyciągania przy zasilaniu cewki chwytaka prądem znamionowym, równą wartości siły założonej w obliczeniach analitycznych ($F=3200$ N). Wobec tego można stwierdzić, że współczynniki przewodzenia ciepła zostały dobrane poprawnie.

LITERATURA

- [1] Maempel J., Koehring S., Schilling C., Witte H.: Using Different Adhesion Technologies in Modular Robot for Climbing, IEEE 2010.
- [2] Kolhalkar N. R., Patil S. M.: Wall Climbing Robots: A Review, IJEIT Volume 1, Issue 5, 2012.
- [3] Moniri M., Bamdad M., Sayyadan M., A novel design of wall climbing robot for inspection of storage steel tanks, IEEE 2016.
- [4] Ishihara H., Basic study on wall climbing robot with magnetic passive wheels, IEEE 2007.
- [5] Yang S., Thermal analysis of a DC electromagnet with high thermal conductivity inserts, Tallahassee: Florida State University, 2016.
- [6] Comsol Multiphysics 5.2a User's Guide, Modeling Guide and Model Library, Documentation Set, Comsol AB, 2019.
- [7] Zienkiewicz O.C., Metoda elementów skończonych, Warszawa: Arkady, 1972.
- [8] Jiannan C., Kai H., Haitao F., Hao C., Shaojie H., Zhou W., The design of permanent-magnetic wheeled wall-climbing robot, IEEE 2017.
- [9] Cengel Y.A., Heat transfer: a practical approach, Boston: McGraw-Hill, 2003.
- [10] Baranski M., Szlag W., Jedryczka C., Influence of temperature on partial demagnetization of the permanent magnets during starting process of line start permanent magnet synchronous motor, Electrical Machines (SME), 2017 International Symposium on, Poland,

3D THERMAL FIELD MODELLING IN ELECTROMAGNETIC GRIPPING SYSTEM USING COMSOL MULTIPHYSICS

In this paper, 3D steady-state thermal field modeling in electromagnetic gripping system using Comsol Multiphysics was presented. The electromagnetic gripping system, which is a component of the mechanical leg of a walking robot was designed by the authors. An algorithm to design of the electromagnetic gripping as well as mathematical model of electromagnetic and thermal phenomena was developed. During calculations, the influence of the value of the current as well as the influence of the air gap width on the thermal field distribution in steady-state was carried out. Selected results of simulations as well as the analysis of these results were presented.

(Received: 11.01.2019, revised: 04.03.2019)

