

Łukasz Cyganik

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

PORÓWNANIE NAPRĘŻEŃ W KADŁUBIE SILNIKA ELEKTRYCZNEGO O RÓŻNYCH WARIANTACH UKŁADU CHŁODZENIA CIECZĄ DEDYKOWANEGO DO NAPĘDU AUTOBUSU LUB SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO

A COMPARISON OF STRESSES IN THE ELECTRICAL MOTOR BODY WITH DIFFERENT VARIANTS OF LIQUID COOLING SYSTEM DEDICATED FOR USE IN THE BUS OR TRUCK

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analiz numerycznych stanu naprężenia dla kadłuba silnika elektrycznego dedykowanego do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego o mocy ok. 150 kW. Celem pracy było porównanie wartości naprężeń w kadłubie silnika elektrycznego przy różnych wariantach układu chłodzenia cieczą. Analizom numerycznym poddano warianty kadłuba z pojedynczym kanałem chłodzącym w kształcie spirali oraz warianty kadłuba z układem równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących. Ponadto, analizowano również wpływ zaokrągleń krawędzi kanałów chłodzących na redukcję poziomu naprężeń w kadłubie. W warunkach brzegowych uwzględniono działanie stałego co do wartości i kierunku działania momentu skręcającego oraz sił ciężkości stojana, wirnika oraz samego kadłuba. Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że wybór układu chłodzenia w kadłubie silnika elektrycznego ma istotny wpływ na poziom generowanych w nim naprężeń. Analizę prowadzono metodą elementów skończonych w systemie Autodesk Inventor 2012.

Abstract: The article presents the results of the numerical analyses of mechanical stresses in the electrical motor body dedicated for use in the bus or truck with a capacity of approx. 150kW. The aim of the study was to compare the stresses in the electrical motor body with different variants of liquid cooling system. The numerical analyses were conducted for the variants of motor body with single spiral-shaped cooling channel and for variants of motor body with a system of parallel annular cooling channels. In addition, the influence of rounding edges in the cooling channels on the reduction of stress level was also analyzed. In the boundary conditions, the torque and gravity forces of stator, rotor and motor body that were constant in value and direction were taken into account. The results of numerical calculations indicate that the selection of the cooling system in the electric motor body has a significant influence on the mechanical stress level generated in this body. The analyses were conducted using a finite element method in the Autodesk Inventor 2012 system.

Słowa kluczowe: *elektromobilność, kadłub silnika, analiza numeryczna, układ chłodzenia silnika elektrycznego, metoda elementów skończonych*

Keywords: *electromobility, electrical motor body, numerical analysis, electrical motor cooling system, finite element method*

1. Wstęp

Dobór odpowiedniego układu chłodzenia w kadłubie silnika elektrycznego ma duże znaczenie nie tylko na wydajność odprowadzania ciepła z silnika [1,2], ale również na poziom naprężeń powstających w kadłubie podczas pracy silnika. Dlatego też, projektując od podstaw układ chłodzenia cieczą w korpusie silnika elektrycznego warto wziąć pod uwagę nie tylko efektywność odprowadzania ciepła, ale również poziom spiętrzenia naprężeń w kadłubie spowodowany obecnością projektowanych kanałów chłodzących. Znaczenie analiz naprężeń w ka-

dłubie i innych elementach silnika elektrycznego rośnie zwłaszcza dla silników dużej mocy, gdzie występuje wysoki moment napędowy [3]. Celem niniejszej pracy jest porównanie wpływu różnych wariantów układu chłodzenia cieczą na poziom powstających naprężeń w kadłubie silnika elektrycznego (o mocy ok. 150kW) do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego.

2. Warianty konstrukcyjne kadłuba silnika elektrycznego z układem chłodzenia cieczą

Analizie naprężeń poddano kadłub z 2. wariantami układu chłodzenia przedstawionymi w pracy [4]: z pojedynczym kanałem chłodzącym w kształcie spirali oraz z układem równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących połączonych z osiowymi kanałami doprowadzającymi/odprowadzającymi ciecz chłodzącą. Ponadto, dla każdego wariantu układu chłodzenia analizowano dwa różne kształty kanałów chłodzących: z krawędziami prostymi (założono wykonanie kanału frezem cylindrycznym) oraz z krawędziami zaokrąglonymi (założono wykonanie frezem cylindrycznym zaokrąglonym). Szerokość kanałów dobrano w taki sposób, aby przekrój poprzeczny kanałów z krawędziami ostrymi i zaokrąglonymi był równy. Głębokość kanałów była stała i wynosiła 7mm. Łącznie analizom naprężeń poddano 4 warianty kadłuba:

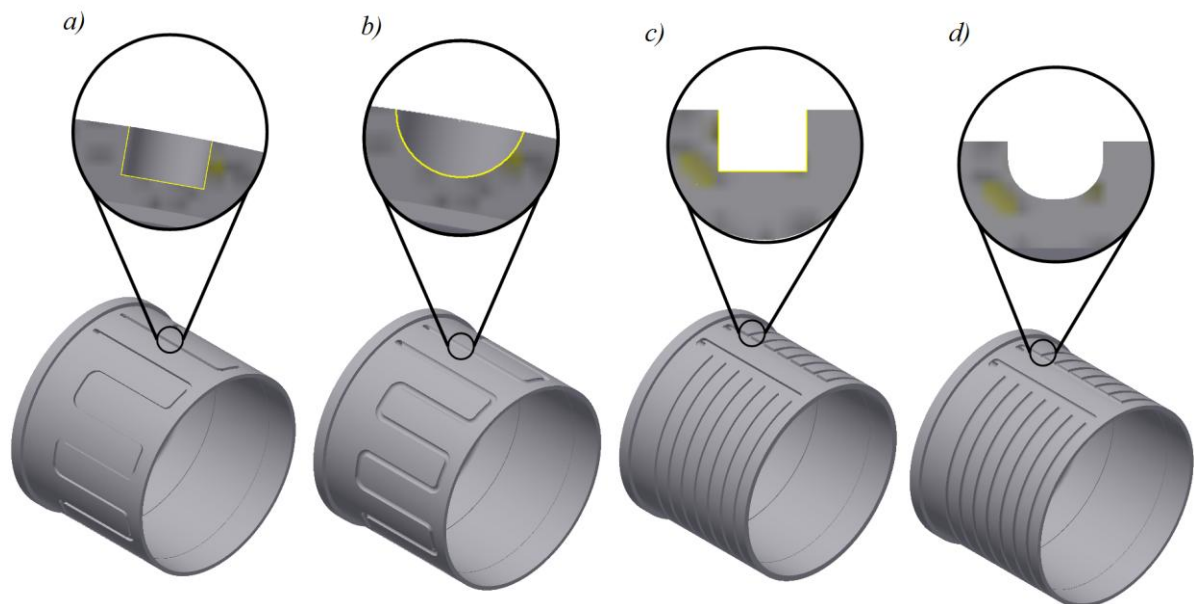
1. kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym o przekroju prostokątnym (krawędzie proste, szerokość kanału = 12mm),
2. kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym o przekroju półokrągłym (średnica zaokrąglenia kanału = $\varnothing 16\text{mm}$),
3. kadłub z układem 7. równoległych pierścieniowych kanałów z krawędziami prostymi

(szerokość kanału = 10mm),

4. kadłub z układem 7. równoległych pierścieniowych kanałów z krawędziami zaokrąglonymi (szerokość kanału = 11,5mm, promień zaokrąglenia krawędzi $R=5\text{mm}$). Warianty konstrukcyjne kadłuba przedstawiono na rys. 1. Średnica zewnętrzna kadłuba, na której znajdują się kanały chłodzące wynosiła $\varnothing 500\text{mm}$, a średnica wewnętrzna pod stojan $\varnothing 478\text{mm}$. Całkowita długość kadłuba wynosiła 400mm.

3. Model numeryczny kadłuba

Na potrzeby analizy numerycznej przygotowano modele numeryczne każdego analizowanego wariantu kadłuba osobno. Każdy model numeryczny składał się z około 300 000 elementów skończonych TET4 (rys. 2). W warunkach brzegowych uwzględniono działanie stałego co do wartości i kierunku działania momentu skręcającego oraz sił ciężkości stojana, wirnika oraz samego kadłuba. Ze względu na fakt, że celem pracy była tylko analiza porównawcza poziomów naprężeń dla różnych wariantów układu chłodzenia w kadłubie, to w warunkach brzegowych nie uwzględniano sił dynamicznych powstających przy różnych fazach pracy silnika. Nie uwzględniono również naprężeń wstępnych w kadłubie związanych z wciskowym połączeniem pakietu stojana i kadłuba.



Rys.1. Warianty konstrukcyjne kadłuba: a) kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym o przekroju prostokątnym, b) kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym o przekroju półokrągłym c) kadłub z 7. równoległymi kanałami pierścieniowymi z krawędziami prostymi, d) kadłub z 7. równoległymi kanałami pierścieniowymi z krawędziami zaokrąglonymi

Warunki brzegowe były więc następujące:

1. na wewnętrznej powierzchni walcowej kadłuba (powierzchnia kontaktu kadłuba i pakietu stojana) przyłożono moment skręcający wynikający z przenieszonego momentu obrotowego o wartości $4000\text{N}\cdot\text{m}$,

2. do tej samej powierzchni walcowej co moment skręcający przyłożono siłę skierowaną wzdłuż osi Y (o przeciwnym do osi Y zwrocie) o wartości odpowiadającej ciężarowi stojana uzwojonego $Q_s=1370\text{N}$,

3. do walcowej powierzchni gniazda łożyskowego przyłożono siłę skierowaną wzdłuż osi Y (o przeciwnym do osi Y zwrocie) odpowiadającą połowie wartości ciężaru wirnika $Q_w=585\text{N}$,

4. uwzględniono działanie grawitacji działającej wzdłuż osi Y, ale o przeciwnym zwrocie o wartości przyspieszenia ziemskiego $g=9,81\text{m/s}^2$,

5. powierzchnię czołową kadłuba od strony przeciwnapędowej utwierdzono wiązaniem stałym,

6. do wewnętrznej powierzchni walcowej od strony napędowej (powierzchnia osadzenia tarczy łożyskowej) przyłożono wiązanie sworznia (w miejscu tego wiązania kadłub mógł się obracać i przesuwąć wzdłuż osi X).

Warunki brzegowe, identyczne dla każdego wariantu kadłuba, przedstawiono na rys. 3, przy czym powierzchnie do których przyłożono obciążenia zaznaczono na czerwono, a powierzchnie wiązań zaznaczono na zielono.

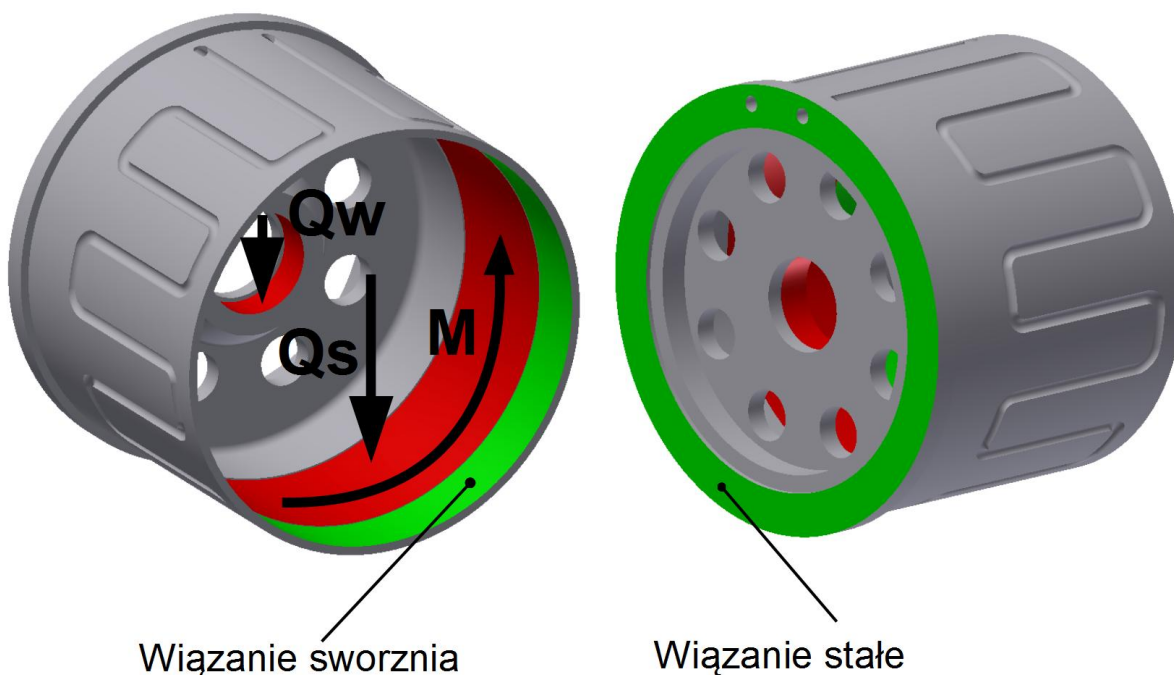
Węzły: 46,2019
Elementy: 237229



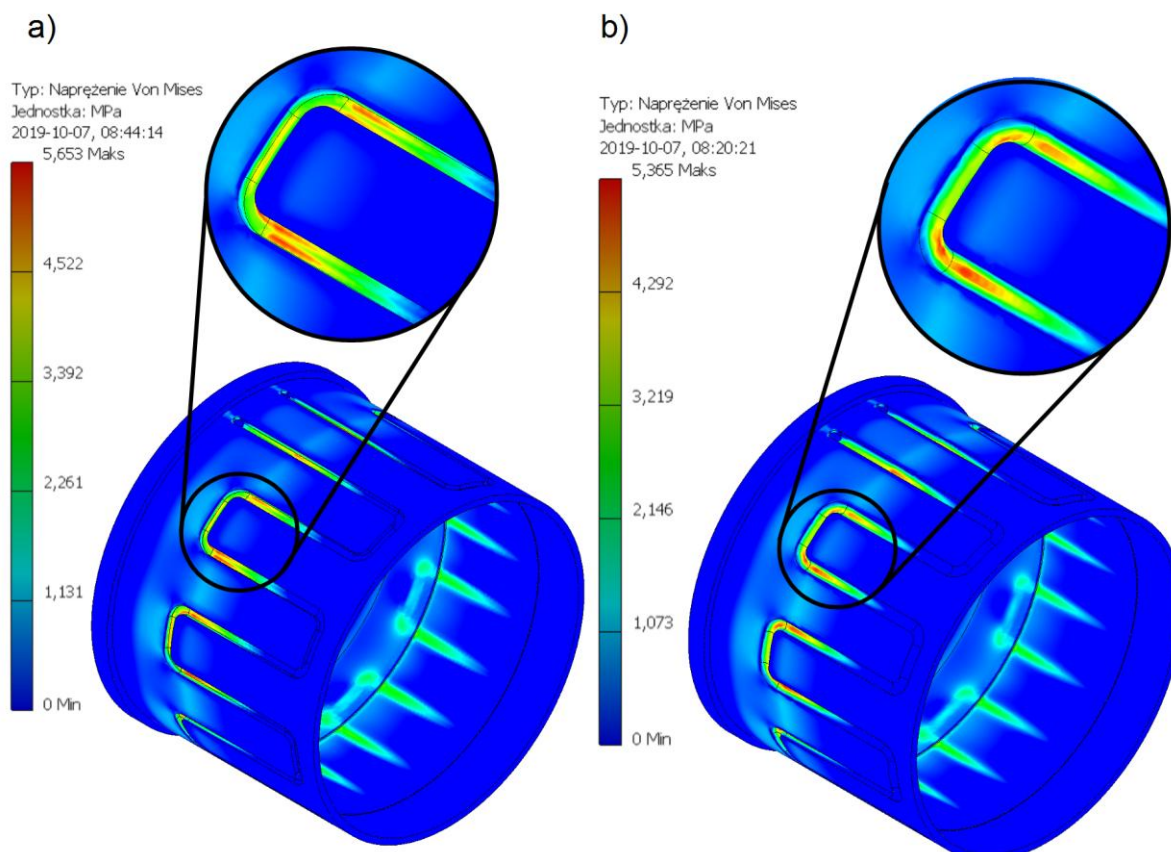
Rys. 2. Przykładowa siatka elementów skończonych

4. Wyniki obliczeń numerycznych

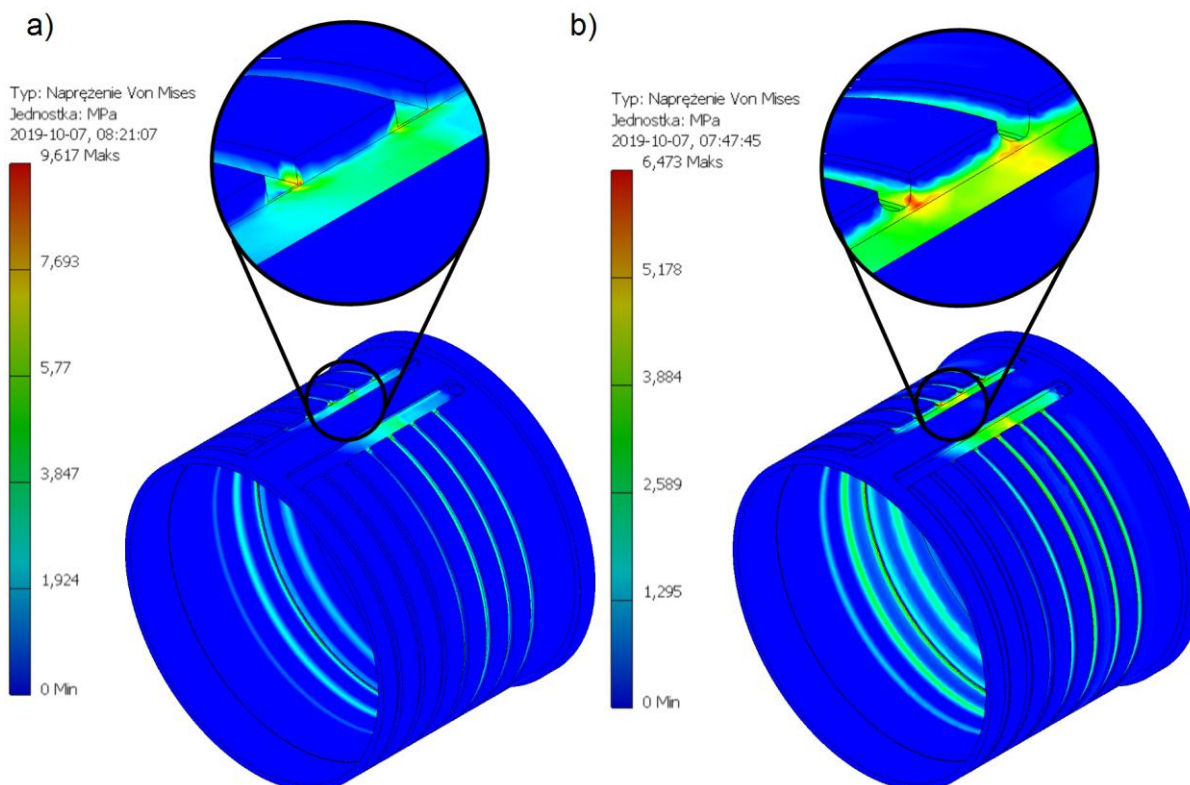
Wyniki obliczeń numerycznych w postaci map naprężeń redukowanych von Misesa dla wszystkich wariantów kadłuba przedstawiono na rysunkach 4 i 5. W kadłubie ze spiralnym układem chłodzenia (rys. 4a) uzyskano maksymalne naprężenia o wartości $\sigma_{v1max}=5,653\text{ MPa}$ i są znacząco mniejsze od naprężeń maksymalnych uzyskanych w kadłubie z układem równoległych kanałów chłodzących $\sigma_{v3max}=9,617\text{ MPa}$.



Rys. 3. Warunki brzegowe w modelach numerycznych kadłuba



Rys. 4. Mapy naprężeń zredukowanych von Misesa dla kadłuba ze spiralnym układem chłodzenia w którym kanał chłodzący ma przekrój: a) prostokątny (wariant 1), b) półokrągły (wariant 2)



Rys. 5. Mapy naprężeń zredukowanych von Misesa dla kadłuba z układem równoległych kanałów chłodzących z krawędziami a) prostymi (wariant 3), b) zaokrąglonymi (wariant 4)

W przypadku kadłubów, w których kanały układu chłodzenia mają zaokrąglone krawędzie (wariant 2 i 4), różnice pomiędzy naprężeniami maksymalnymi nie są znacząco istotne. Maksymalne naprężenia dla drugiego i czwartego wariantu kadłuba wynosiły odpowiednio $\sigma_{V2max}=5,365$, $\sigma_{V4max}=6,473$. Niewielka różnica występuje również przy porównaniu maksymalnych naprężeń dla spiralnego układu chłodzenia w wariacie z kanałem prostokątnym i zaokrąglonym (warianty 1 i 2). Oczywiście należy mieć na uwadze, że w przypadku zastosowania w obliczeniach znacznie gęstszej siatki elementów skończonych i/lub adaptacyjnych metod optymalizacji siatki, to różnice w poziomach maksymalnych naprężeń mogłyby być wyższe.

Istotne różnice występują również w rozkładzie naprężeń przy porównaniu układów chłodzenia spiralnego i równoległego. W przypadku układu spiralnego główne spiętrzenia naprężeń występują w zakolach spirali (rys. 4), natomiast w układzie chłodzenia z układem równoległych kanałów pierścieniowych spiętrzenia naprężeń występują na krawędziach styku pierścieniowych kanałów chłodzących z kanałami doprowadzającymi ciecz chłodzącą. Kanały doprowadzające ciecz chłodzącą w równoległym układzie chłodzenia stanowią więc miejsce koncentracji naprężeń i mogą osłabiać wytrzymałość i sztywność całego kadłuba.

5. Podsumowanie

Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że wybór układu chłodzenia w kadłubie silnika elektrycznego ma istotny wpływ na poziom i rozkład generowanych w nim naprężeń. Wykonanie analiz numerycznych pozwala w łatwy sposób zidentyfikować miejsca koncentracji naprężeń, które powinny zostać przekonstruowane, aby podczas eksploatacji silnika ograniczyć ryzyko powstania pęknięć i nieszczelności w kadłubie. Tym bardziej, że oprócz naprężeń związanych z obciążeniami mechanicznymi, w kadłubie silnika chłodzonego cieczą występują również naprężenia termiczne.

6. Literatura

- [1]. Będkowski B., Madej J., "Analiza wydajności różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia silnika elektrycznego do zabudowy w kole", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1 (117), str. 33–38, 2018.
- [2]. Będkowski B., Madej J., "Obliczenia cieplne wirujących maszyn elektrycznych - problemy modelowania", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2 (114), str. 161-168, 2017.

[3]. Opach Sz., "Obliczenia wytrzymałości statycznej elementów nośnych korpusu koncepcyjnego silnika do napędu autobusu elektrycznego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1 (117), str. 45–49, 2018.

[4]. Cyganik Ł., "Analiza termiczna kadłuba silnika elektrycznego do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 1 (121), str. 73-78, 2019.