

Łukasz Cyganik, Emil Król,
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Jerzy Baranowski, Tomasz Drabek, Tomasz Dziwiński, Paweł Piątek
AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

ANALIZA TERMICZNA OBUDOWY SILNIKA DO ZAKRĘTARKI ELEKTROMECHANICZNEJ

THERMAL ANALYSIS OF THE MOTOR HOUSING FOR THE ELECTRIC TORQUE WRENCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę termiczną obudowy silnika zakrętarki elektromechanicznej. Celem pracy było przeprowadzenie analizy nagrzewania obudowy podczas pracy zakrętarki elektromechanicznej oraz wyznaczenie rozkładu temperatury na obudowie dla stanu ustalonego. Sposób chłodzenia obudowy wg założeń konstrukcyjnych to chłodzenie powietrzem poprzez konwekcję naturalną oraz radiację, bez zewnętrznego układu wymuszającego obieg powietrza wokół obudowy. Analizę prowadzono zakładając pracę zakrętarki w dwóch trybach: na biegu jałowym oraz pod obciążeniem. Na potrzeby analizy zamodelowano obudowę zakrętarki, stojan uzwojony oraz pokrywy zamykające obudowę. W modelu numerycznym uwzględniono straty mocy generowane w uzwojeniu oraz pakiecie blach stojana, wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych na modelach silnika do zakrętarki. Analizę nagrzewania prowadzono w 5 punktach pomiarowych zlokalizowanych na obudowie zakrętarki oraz w uzwojeniu stojana. Otrzymane wyniki pozwoliły na ocenę wydajności chłodzenia obudowy zakrętarki elektromechanicznej oraz stanowią podstawę dalszych prac nad optymalizacją konstrukcji.

Abstract: This article presents the thermal analysis of the motor housing for the electric torque wrench. The aim of the study was to analyze the heating process of the motor housing during operation of the electric torque wrench and to determine the temperature distribution for the steady state. According to the design assumptions the cooling method of the motor housing is air cooling through natural convection and radiation without an external systems forcing the circulation of air around the housing. The analysis was performed assuming the operation of the electric torque wrench in two modes: operation at idle and under the load. For the purpose of the thermal analysis the motor housing with closing covers and winded stator were modeled. In the numerical model the power losses in stator winding and stator stack were taken into account. Power losses were determined during the experimental measurements conducted on the research models of the electric motor. The heating process of the motor housing was analyzed in 5 measurement points located on the motor housing and in the electrical winding. The obtained results allowed to evaluate the cooling system efficiency of the motor housing and are the basis for further works on the optimization of the design.

Słowa kluczowe: silnik bezszczotkowy, zakrętarka elektromechaniczna, silnik BLDC, analiza termiczna
Keywords: brushless motor, electric torque tool, BLDC motor, thermal analysis

1. Wstęp

Zakrętarka elektromechaniczna jest urządzeniem, które umożliwia zakręcanie/odkręcanie śrub z dużym momentem dokręcenia /odkręcania. W standardowych rozwiązaniach zakrętarka napędzana jest jednofazowym silnikiem komutatorowym, ale tego typu rozwiązanie uniemożliwia zastosowanie zakrętarek w wielu gałęziach przemysłu charakteryzujących się wysoką wilgotnością, zapyleniem oraz obecnością gazów i pyłów wybuchowych. Aby możliwe było wykorzystanie zakrętarek w tych gałęziach przemysłu, konieczne jest zastosowanie bezszczotkowego silnika w napędzie zakrętarki oraz obudowy o zwiększonej szczel-

ności. Zapewnia to zwiększenie bezpieczeństwa oraz wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy silnika bezszczotkowego [1,2]. Celem realizowanego projektu przez konsorcjum: AGH w Krakowie, Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL w Katowicach oraz Zakładu Budowy Maszyn OSSA w Tychach pt. "Bezczotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna" było opracowanie zakrętarki napędzanej silnikiem bezszczotkowym. Jednym z etapów projektu było zaprojektowanie obudowy silnika, która jest chłodzona powietrzem poprzez naturalną konwekcję oraz radiację. Chłodzenie silnika powinno być na

tyle wydajne, aby temperatura na obudowie podczas użytkowania zakrętarki nie przekraczała 40°C . Spełnienie tego warunku wiązało się z koniecznością wykonania analizy termicznej obudowy.

2. Projekt obudowy silnika zakrętarki elektromechanicznej

Głównymi wytycznymi przy projektowaniu obudowy silnika zakrętarki elektromechanicznej były następujące kryteria:

- szerokość obudowy nie większa niż 87 mm,
- średnica zewnętrzna pakietu stojana $\varnothing 70\text{mm}$,
- temperatura na obudowie podczas pracy zakrętarki nie większa niż 40°C .
- miejsce w obudowie na elektronikę falownika o wymiarach: $120 \times 80 \times 50\text{mm}$.

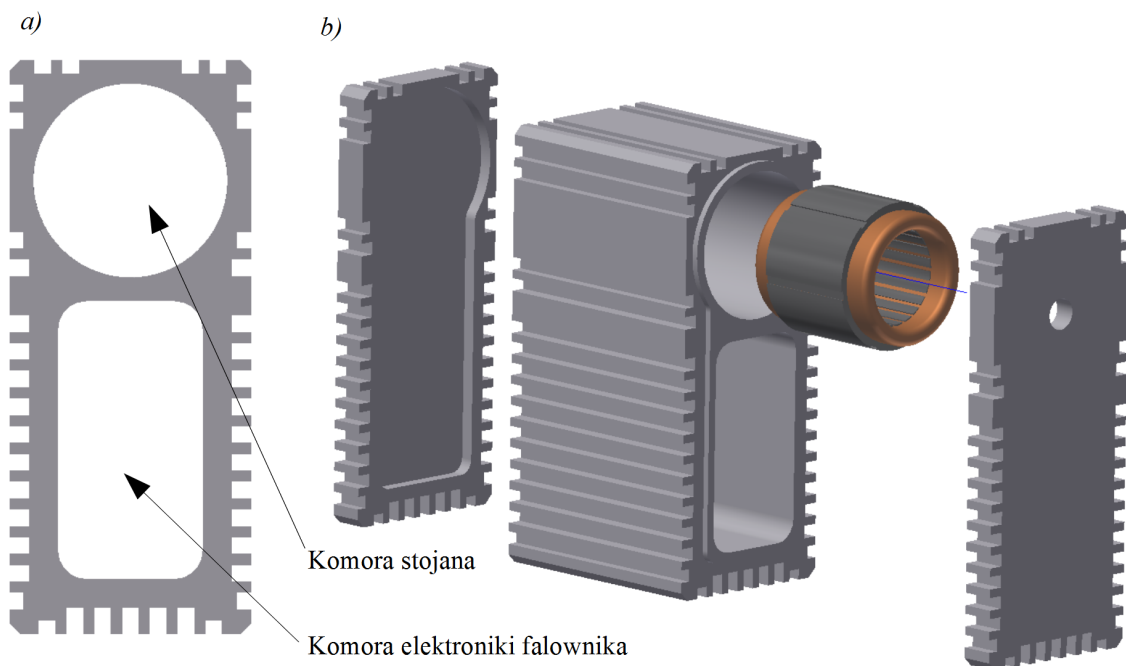
Ponadto, dodatkowym założeniem przy projektowaniu obudowy był fakt, że wymiana ciepła z otoczeniem następować musi tylko poprzez konwekcję swobodną oraz radiację. Ze względu na przeznaczenie obudowy do zastosowania w napędzie bezszczotkowym zakrętarki elektromechanicznej i konieczność zapewnienia szczelności całego urządzenia, obudowa nie mogła być wyposażona w zewnętrzny przewietrznik lub wentylator wymuszający obieg powietrza wokół obudowy.

Uwzględniając powyższe kryteria zaprojektowano obudowę silnika zakrętarki elektromechanicznej, w której silnik umieszczono nad

komorą przewidzianą na elektronikę falownika. Obudowa zaprojektowana była jako niedzielona, żebrowana o powierzchni zewnętrznej wynoszącej 1290 cm^2 , zamykana z obydwu stron pokrywami. Konstrukcję obudowy przedstawia rysunek 1. Podstawowe wymiary zaprojektowanej obudowy to szerokość - 87mm, wysokość - 207mm oraz długość - 120mm (bez pokryw). Obudowa ma uźebrowanie pozwalające zwiększyć powierzchnię oddawania ciepła do otoczenia. Żebra o szerokości 4mm i głębokości 7mm rozmieszczone są w odstępach 6mm. Przyjęto, że obudowa będzie wykonana z aluminium gatunku Pa38 o przewodności cieplnej ok. 200 W/mK .

3. Konstrukcja bezszczotkowego silnika zakrętarki elektromechanicznej

Część parametrów niezbędnych do przeprowadzenia analizy termicznej obudowy (jak np. straty w uzwojeniu i żelazie, opory cieplne pomiędzy pakietem stojana i obudową oraz pakietem i uzwojeniem itp.) wynika wprost z konstrukcji silnika elektrycznego, który ma być w niej umieszczony. W pakiecie stojana zastosowano blachy elektrotechniczne NO20 (Cogent Power). Pomiędzy pakietem stojana oraz obudową silnika technologia wykonania przewiduje zastosowanie pasty termoprzewodzącej zmniejszającej opór cieplny.



Rys. 1. Obudowa silnika zakrętarki elektromechanicznej: a) przekrój obudowy, b) zestawienie obudowy wraz z stojanem uzwojonym oraz pokrywami zamykającymi

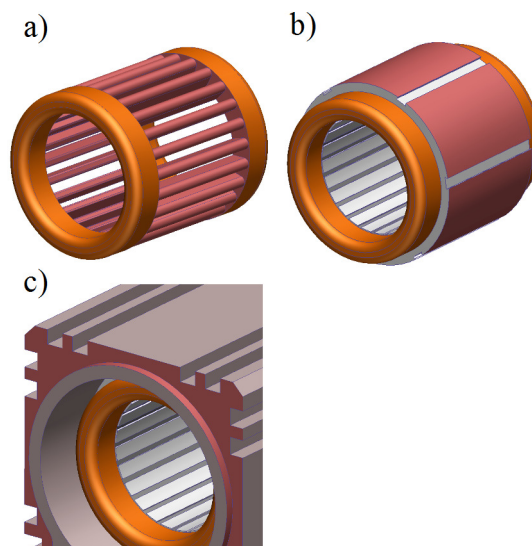
Uzwojenie wirnika wykonane jest z drutu DN2E o podwójnej izolacji ($\varnothing 0,48/\varnothing 0,546\text{mm}$), a łożbki stojana wyłożone są izolacją łożkową NEN grubości 0,2mm. Szczeliny pomiędzy pokrywami, a obudową są wypełnione uszczelnieniem anaerobowym o przewodności cieplnej 0,1W/mK. Konstrukcja silnika bezszczotkowego, jego parametry oraz wyniki badań prowadzonych na modelach silnika zostały bardziej szczegółowo opisane w pracach [3,4].

4. Model numeryczny obudowy silnika

W analizie termicznej wykorzystano model 3D obudowy zamkniętej pokrywami wraz z osadzonym wewnątrz stojanem. Model zorientowano w przestrzeni w ten sposób, że oś X jest równoległa do osi obrotu wirnika w silniku. W modelu 3D, puste przestrzenie wewnątrz obudowy wypełniono dodatkową geometrią, której przypisano własności materiałowe dla powietrza. Własności materiałowe przypisane do poszczególnych części modelu numerycznego zestawiono w tabeli 1. Przewodność cieplną dla pakietu blach NO20 przypisano na podstawie danych zawartych w karcie katalogowej producenta blach [5]. Zastępczą przewodność cieplną uzwojenia w osiach prostopadłych do kierunku nawijania cewek (osie Y i Z) wyznaczono na podstawie metodologii przedstawionej w pracy [6], przy wykorzystaniu danych drutu nawojowego, z któ-

rego wykonane są cewki w silniku. Przewodność cieplną uzwojenia wzdłuż kierunku nawijania (oś X) przyjęto na podstawie wytycznych podanych w pracy [7].

W modelu numerycznym, na powierzchniach kontaktu poszczególnych części modelu numerycznego założono opory cieplne, wynikające z konstrukcji i technologii wykonania silnika i obudowy. Powierzchnie kontaktu, do których



Rys. 2. Powierzchnie oporu cieplnego (zaznaczone na czerwono):

- a) pomiędzy uzwojeniem a pakietem blach,
- b) pomiędzy pakietem blach a obudową,
- c) pomiędzy obudową a pokrywami

Tab. 1. Parametry materiałowe przypisane do poszczególnych komponentów modelu numerycznego [7-8]

L.p.	Parametr materiałowy	Oś	Komponent modelu numerycznego silnika			
			Obudowa/pokrywy (Aluminium)	Pakiet stojana	Uzwojenie	Powietrze
1.	gęstość (ρ)	X,Y,Z	2707 [kg/m ³]	7650 [kg/m ³]	8940 [kg/m ³]	Równanie stanu, indywidualna stała gazowa ($r=287,05 \text{ J/kgK}$)
2.	przewodność cieplna (λ)	X	204 [W/mK]	0,37 [W/mK]	290 [W/mK]	0,02563 [W/mK]
		Y		28 [W/mK]	0,36 [W/mK]	
		Z		28 [W/mK]	0,36 [W/mK]	
3.	ciepło właściwe (C_w)	X,Y,Z	896 [J/kgK]	465 [J/kgK]	380 [J/kgK]	1000 [J/kgK]
4.	emisyjność (ϵ)	X,Y,Z	0,2	0,3	0,6	-
5.	lepkość dynamiczna (η)	X,Y,Z	-	-	-	$1,8 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$

przypisany był opór cieplny przedstawiono na rysunku 2. Wartość oporu cieplnego na powierzchni kontaktu uzwojenia oraz pakietu blach wynika z zastosowanej izolacji żłobkowej. Izolacja ta jest wykonana z materiału NEN o gr. 0,2mm składającego się z warstwy folii Nomex (o gr. ok 0,05mm) sklejonej z folią poliestrowej Mylar. Wartość oporu cieplnego dla izolacji NEN oszacowano na podstawie wzoru:

$$R_{NEN} = \frac{d_{nomex}}{\lambda_{nomex}} + \frac{d_{Mylar}}{\lambda_{Mylar}}, \quad (1)$$

gdzie:

d_i - grubość warstwy materiału "i" w [m],

λ_i - przewodność cieplna materiału "i" w [W/mK].

Przyjmując przewodności cieplne materiałów:

- $\lambda_{nomex} = 0,13$ W/mK [8],
- $\lambda_{Mylar} = 0,28$ W/mK,

oszacowano wartość oporu cieplnego dla izolacji NEN:

$$R_{NEN} = 0,00092 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

W podobny sposób oszacowano wartość oporu cieplnego na powierzchni kontaktu pomiędzy pakietem blach oraz obudową silnika, zakładając obecność pasty termoprzewodzącej o grubości 0,05mm ($\lambda_{pasty} = 0,88$ W/mK). Oszacowana wartość oporu cieplnego pasty wynosi:

$$R_{pasty} = 0,000056 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

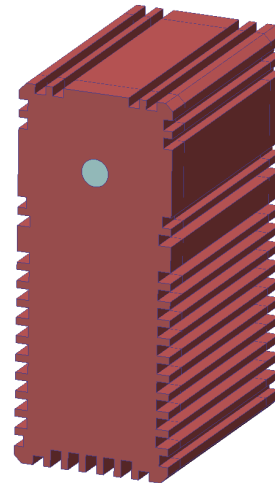
Natomiast, opór cieplny pomiędzy obudową silnika a pokrywami oszacowano zakładając obecność uszczelnienia anaerobowego o grubości 0,1mm ($\lambda_{uszcz.} = 0,1$ W/mK):

$$R_{uszcz.} = 0,001 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

Źródła ciepła w silniku elektrycznym wynikają ze strat mocy, które są przetwarzane na energię cieplną. Straty te są generowane w uzwojeniu, pakiecie blach stojana oraz w ruchomych elementach mechanicznych (np. łożyska). Na podstawie badań przeprowadzonych na modelowych silnikach zakrętkarki elektromechanicznej [4] zidentyfikowano straty mocy dla dwóch trybów pracy silników modelowych:

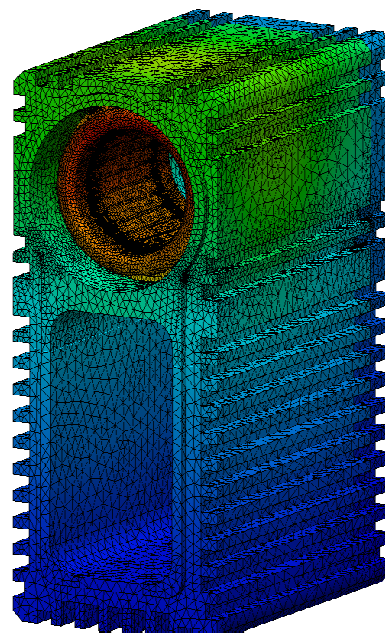
- biegu jałowego ($n=9500$ obr/min, $M=0,01$ Nm):
straty w uzwojeniu = 4,5W,
straty w żelazie + mechaniczne = 62 W,
- pracy pod obciążeniem ($n=9500$ obr/min, $M=1,2$ Nm):
straty w uzwojeniu = 30W,
straty w żelazie + mechaniczne = 54 W.

Powyższe wartości strat założono w modelu numerycznym przypisując odpowiednie wartości generowanego ciepła do modeli uzwojenia oraz pakietu blach stojana. Straty mechaniczne w łożyskach pominięto, ze względu na niską wartość tych strat (<1W). Na powierzchniach zewnętrznych obudowy oraz pokryw (rys. 3) założono warunek brzegowy 3 rodzaju przyjmując współczynnik przejmowania ciepła na tych powierzchniach o wartości $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ i temperaturę otoczenia $T_{ot} = 21^\circ\text{C}$.



Rys. 3. Powierzchnie zewnętrzne, na których założono warunek brzegowy 3 rodzaju

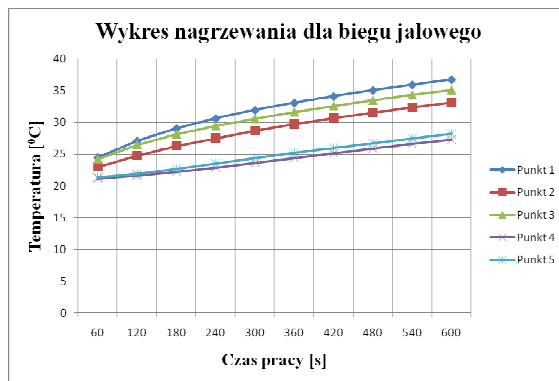
Model numeryczny po podziale na elementy skończone TET4 składał się z 1 590 593 elementów skończonych. Model z wygenerowaną siatką przedstawiono na rysunku 4.



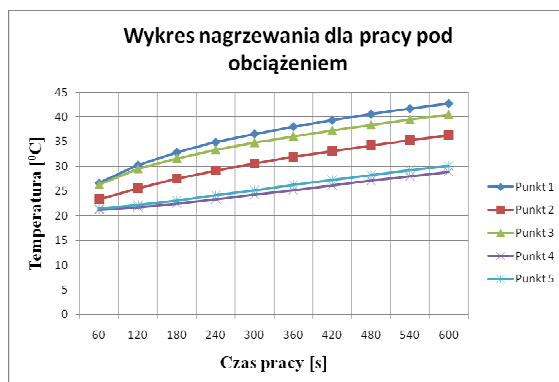
Rys. 4. Siatka elementów skończonych w modelu numerycznym obudowy

5. Wyniki obliczeń numerycznych

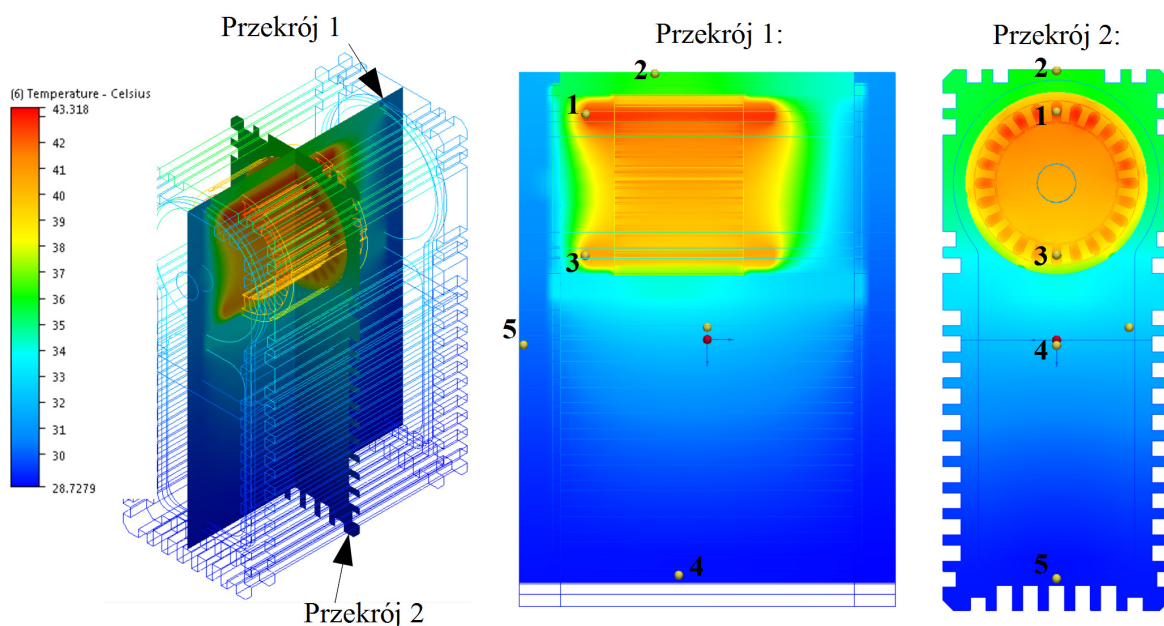
Charakter pracy zakrętkarki elektromechanicznej nie jest ciągły. Jest to praca przerywana, w której sam proces zakręcania/ odkręcania śruby wynosi kilkanaście sekund, z czego większość tego czasu to praca na biegu jałowym. Dlatego też, w ramach obliczeń numerycznych przeprowadzono analizę termiczną nie tylko dla stanu ustalonego, ale również analizowano proces nagrzewania obudowy silnika w czasie 10 minut pracy ciągłej zarówno pod obciążeniem jak dla biegu jałowego. Wyniki uzyskane dla analizy nagrzewania obudowy przedstawione są na rysunkach 5 i 6. Temperatury odczytywano w 5 punktach pomiarowych, których położenie przedstawione jest na mapie rozkładu temperatury dla pracy pod obciążeniem (rys. 7). Temperatura na obudowie po 10 minutach pracy pod obciążeniem wyniosła 36°C i 33°C dla biegu jałowego (punkt 2). Rozkłady temperatury dla stanu ustalonego przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Maksymalne osiągnięte temperatury w stanie ustalonym to 63,6°C i 53,2°C, odpowiednio dla pracy pod obciążeniem i biegu jałowego. Obliczenia numeryczne prowadzono w systemie Autodesk Simulation Multiphysics 2013.



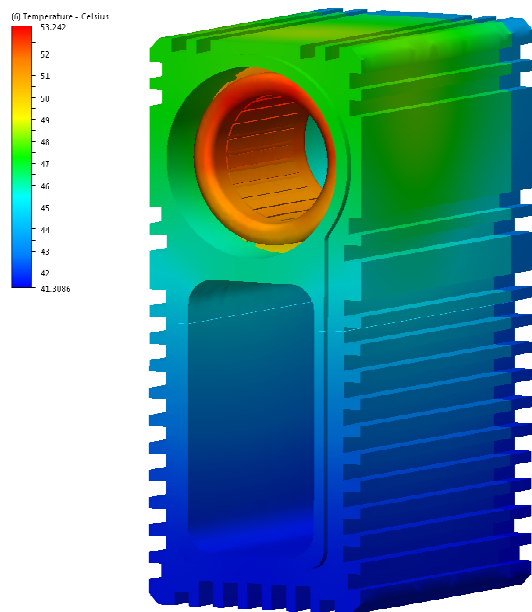
Rys. 5. Wykres nagrzewania w czasie 10 minut obudowy zakrętkarki podczas pracy na biegu jałowym. Przedstawiono pomiary w 5 punktach obudowy/stojana zakrętkarki



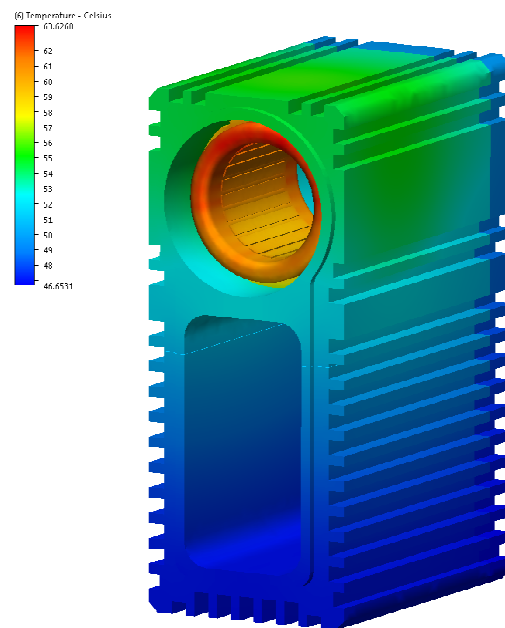
Rys. 6. Wykres nagrzewania w czasie 10 minut obudowy zakrętkarki podczas pracy pod obciążeniem. Przedstawiono pomiary w 5 punktach obudowy/stojana zakrętkarki



Rys. 7. Mapy rozkładu temperatury dla analizy termicznej nagrzewania (transient) po 10 minutach pracy silnika z obciążeniem na wybranych powierzchniach obudowy (w punktach 1-5 zainstalowane są czujniki do pomiaru temperatury)



Rys. 8. Mapa rozkładu temperatury w obudowie dla stanu ustalonego podczas pracy silnika na biegu jałowym



Rys. 9. Mapa rozkładu temperatury w obudowie dla stanu ustalonego podczas pracy silnika pod obciążeniem

6. Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonej analizy termicznej wskazują, że temperatura na obudowie po czasie 10-minutowej pracy nie przekracza 40°C zarówno dla pracy pod obciążeniem, jak i dla biegu jałowego. W przypadku stanu ustalonego temperatura na obudowie wynosi ok 48°C dla biegu jałowego oraz 56°C dla pracy pod obciążeniem. Wynika z tego, że główne kryterium podczas projektowania obudowy zakładające, że temperatura maksymalna na obudowie nie może przekroczyć 40°C nie jest spełnione w stanie ustalonym. Aby spełnić to kryterium, należy zwiększyć powierzchnię oddawania ciepła do otoczenia, poprzez zmianę geometrii uźebrowania i zwiększenie liczby żeber. Projekt obudowy wymaga zatem modyfikacji i przeprowadzenia ponownych analiz termicznych oraz weryfikacji doświadczalnej.

Projekt jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych nr PBS3/B4/13/2015.

7. Literatura

[1]. Gawron S., Baranowski J., Piątek P., Ossa J., "Bezszcotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna Brushless electric torque tool" *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2 (106), str. 113–116, 2015.

[2]. Król E., Rossa R., "Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem" *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 81, str. 27–31, 2009.

[3]. Cyganik Ł., Król E., Baranowski J., Drabek T., Dziwiński T., Piątek P., „Koncepcja bezszczotkowego silnika do zakrętarki elektromechanicznej“, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3 (111), str. 133-138, 2016.

[4]. Cyganik Ł., Król E., Baranowski J., Drabek T., Dziwiński T., Piątek P., „Konstrukcja bezszczotkowego silnika do zakrętarki elektromechanicznej“, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2 (114), str. 141-145, 2017.

[5]. Karta katalogowa blach NO20 ("Electrical Steel, Thin Non-Oriented Grades"), Cogent Power

[6]. Będkowski B., Madej J., "Wyznaczanie zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej - badania i symulacje", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2 (106), str. 123-127, 2015.

[7]. Siesing L., Reinap A., Andersson M., "Thermal properties on high fill factor electrical windings: Infiltrated vs non infiltrated", IEEE, Berlin, 2014, s. 2218-2223.

[8]. Będkowski B., Madej J., "Obliczenia cieplne wirujących maszyn elektrycznych - problemy modelowania", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2 (114), str. 161-168, 2017.