

Łukasz Cyganik
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ANALIZA TERMICZNA KADŁUBA SILNIKA ELEKTRYCZNEGO DO NAPĘDU AUTOBUSU LUB SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO

THERMAL ANALYSIS OF THE ELECTRICAL MOTOR BODY FOR A ELECTRICAL DRIVE SYSTEM OF THE BUS OR TRUCK

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę termiczną kadłuba silnika elektrycznego do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego o mocy ok. 150 kW. Celem pracy było porównanie wydajności układu chłodzenia dla kilku wariantów konstrukcyjnych kadłuba silnika elektrycznego. Analizie numerycznej poddano modele kadłuba z układem chłodzenia cieczą dla następujących wariantów konstrukcyjnych: z pojedynczym kanałem spiralnym, z 7 równoległymi kanałami pierścieniowymi, z 12 równoległymi kanałami pierścieniowymi. W analizowanych modelach numerycznych uwzględniono również warianty z czołami uzwojenia stojana zalanymi żywicą epoksydową poprawiającą odprowadzanie ciepła z czoł. Model numeryczny składał się z: kadłuba z układem chłodzenia, płaszczka zewnętrznego, stojana z uzwojeniem, tarczy łożyskowej oraz w zależności od wariantu - zalewy z żywicy epoksydowej. W modelu numerycznym uwzględniono straty mocy generowane w uzwojeniu oraz pakiecie blach stojana oraz opory cieplne na powierzchniach kontaktu uzwojenia z pakietem blach stojana i żywicy, a także na powierzchniach kontaktu pakietu blach stojana i żywicy z powierzchnią wewnętrzną kadłuba. Otrzymane wyniki pozwoliły na ocenę wydajności chłodzenia poszczególnych wariantów konstrukcyjnych kadłuba silnika elektrycznego w stanie ustalonym.

Abstract: This article presents the thermal analysis of the electrical motor body for the electrical drive system of the bus or truck with a capacity of approx. 150kW. The aim of the study was to compare the efficiency of the cooling system for the several construction variants of the motor body. The numerical analyses were performed for the following construction variants of the motor body with liquid cooling system: the motor body with single spiral cooling channel, the motor body with 7 parallel ring-shaped cooling channels, the motor body with 12 parallel ring-shaped cooling channels. Additionally, in the numerical analyses were taken into account the construction variants with stator windings filled in the epoxy resin, that improves the heat transfer from windings to the motor body cooling system. The numerical model consisted of: a motor body with cooling system, a motor body outer shell, a stator with a windings, a closing cover (bearing housing) and depending on the construction variant - an epoxy resin. In the numerical model the power losses in stator winding and stator stack were taken into account. Furthermore, the thermal resistances on the contact surfaces between a windings, a stator stack, an epoxy resin and a motor body were taken into account in the numerical models. The obtained results allowed to evaluate the cooling system efficiency of the analyzed construction variants of electrical motor body in the steady state.

Słowa kluczowe: *elektromobilność, silnik z magnesami trwałymi, analiza termiczna, układ chłodzenia silnika elektrycznego*

Keywords: *electromobility, permanent magnets electrical motor, thermal analysis, electrical motor cooling system*

1. Wstęp

Postępujące zanieczyszczenie powietrza w miastach, którego główną przyczyną obok zanieczyszczeń komunalnych są zanieczyszczenia transportowe, wymusza dynamiczny rozwój elektromobilności [1]. Rozwój elektromobilności związany jest nierozłącznie z koniecznością ciągłego doskonalenia silników elektrycznych dedykowanych do zastosowania w napędach samochodów osobowych, ciężarowych lub autobusów. Głównymi celami prowadzonych obecnie na świecie badań jest zwiększenie zasięgu pojazdów elektrycznych, zwiększenie mocy

silników elektrycznych oraz ograniczenie masy całego napędu elektrycznego. W Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL również są prowadzone intensywne prace nad silnikami elektrycznymi przeznaczonymi dla elektromobilności, w tym przeznaczonymi do napędu autobusów lub samochodów ciężarowych. W tego typu pojazdach wysoki moment obrotowy, przekłada się na wysoką moc silnika, która z kolei wiąże się z dużą ilością generowanego ciepła wynikającego ze strat mocy.

Dlatego też, przy projektowaniu silników dużej mocy do napędu autobusów lub samochodów ciężarowych bardzo istotne jest ograniczenie strat mocy oraz opracowanie wydajnego układu chłodzenia takiego silnika. Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było porównanie wydajności układu chłodzenia dla kilku wariantów konstrukcyjnych kadłuba silnika elektrycznego (o mocy ok. 150kW) do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego.

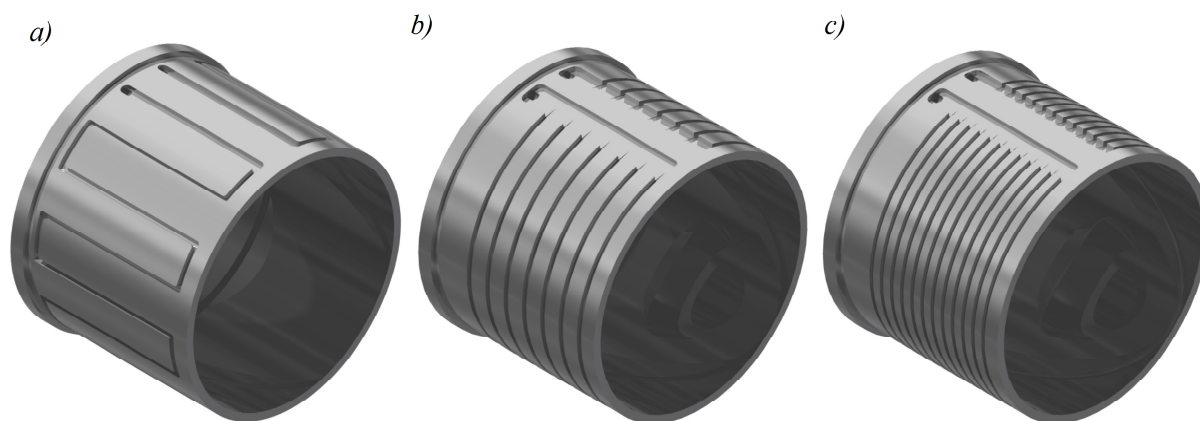
2. Warianty konstrukcyjne kadłuba silnika elektrycznego

W projektowanym kadłubie silnika elektrycznego do napędu autobusu lub samochodu ciężarowego założono chłodzenie cieczą, ze względu na wysoką wydajność takiego układu chłodzenia [2]. Układ chłodzenia w kadłubie składa się z otworów doprowadzających/ odprowadzających ciecz chłodzącą oraz wyfrezowanych kanałów chłodzących, którymi przepływa ciecz. Ze względu na kształt i rozmieszczenie kanałów chłodzących przewidziano 2 warianty konstrukcyjne: pojedynczy kanał chłodzący w kształcie spirali oraz układ równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących połączonych z osiowymi kanałami doprowadzającymi ciecz chłodzącą. W przypadku układu równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących na potrzeby badań założono 2 warianty konstrukcyjne różniące się szerokością oraz ilością kanałów równoległych.

W pierwszym wariantcie w kadłubie przewidziano 7 równoległych kanałów chłodzących o szerokości 10mm, natomiast w drugim wariantcie 12 równoległych kanałów chłodzących o szerokości 8mm (rys. 1). Dodatkowo, w konstrukcji silnika przewidziano możliwość zalewania czoł uzwojenia stojana żywicą epoksydową poprawiającą odprowadzanie ciepła z uzwojenia silnika do kadłuba chłodzonego cieczą. Łącznie do analizy termicznej przewidziano 6 wariantów konstrukcyjnych kadłuba:

1. kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym (szerokość kanału = 10mm),
2. kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym (szerokość kanału = 10mm) oraz czołami uzwojenia zalanymi żywicą,
3. kadłub z układem 7 równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących o szer. 10mm,
4. kadłub z układem 7 równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących o szer. 10mm oraz czołami uzwojenia zalanymi żywicą.
5. kadłub z układem 12 równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących o szer. 8mm,
6. kadłub z układem 12 równoległych pierścieniowych kanałów chłodzących o szer. 8mm oraz czołami uzwojenia zalanymi żywicą.

We wszystkich wariantach konstrukcyjnych głębokość kanałów chłodzących wynosi 10mm, natomiast średnica zewnętrzna pakietu stojana wynosi $\varnothing 470\text{mm}$.



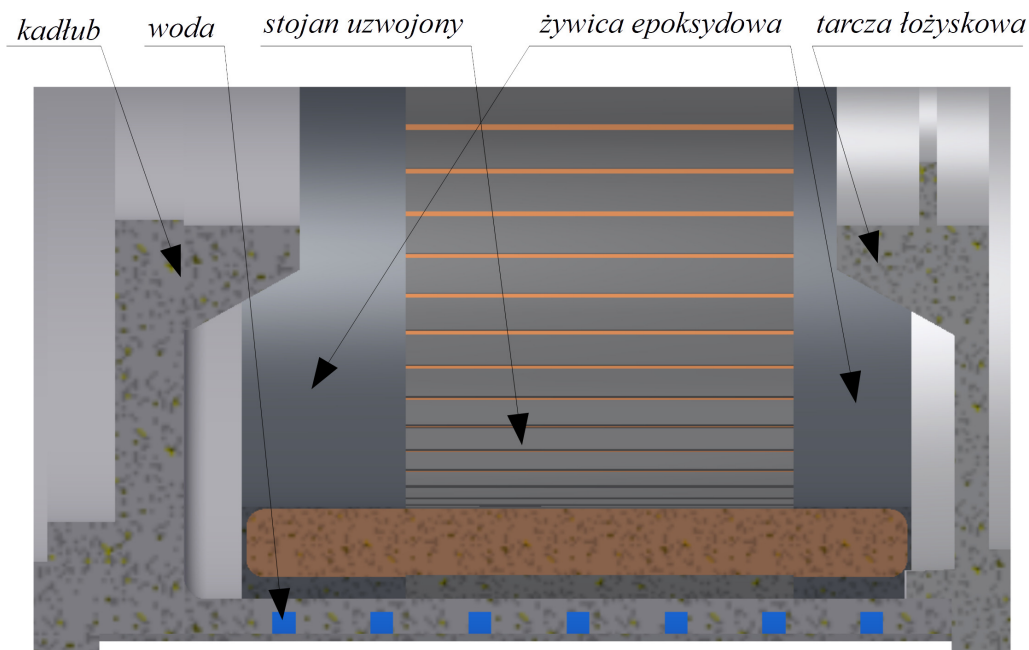
Rys. 1. Warianty konstrukcyjne kadłuba: a) kadłub z pojedynczym kanałem spiralnym, b) kadłub z 7 równoległymi kanałami pierścieniowymi, c) kadłub z 12 równoległymi kanałami pierścieniowymi

3. Model kadłuba do badań symulacyjnych

W celu wykonania obliczeń cieplnych wykonano model 3D składający się z analizowanego kadłuba wraz z płaszczem zewnętrznym oraz tarczą łożyskową zamykającym kanały chłodzące. We wnętrzu kadłuba umieszczono stojan uzwojony oraz w zależności od wariantu zalewę z żywicy epoksydowej (rys. 2). W modelu

uwzględniono strugę cieczy (wody) przepływającej w kanałach chłodzących.

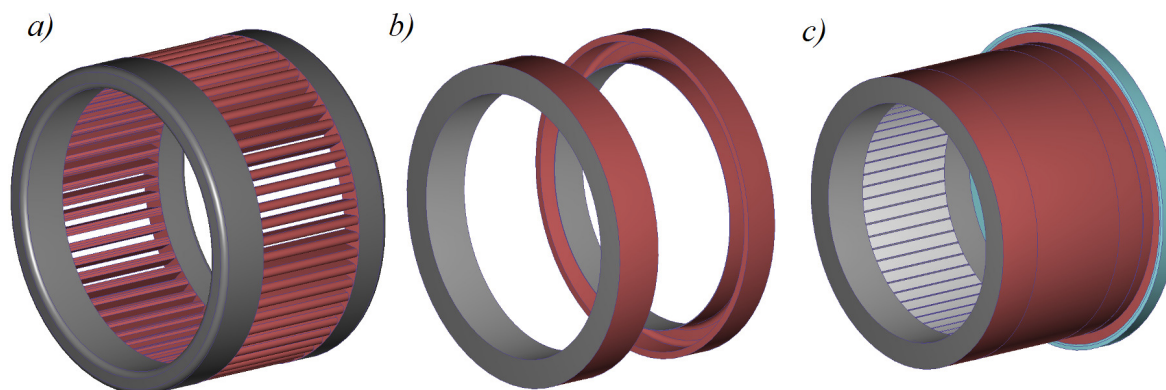
Oś obrotu wirnika odpowiada osi X. Na potrzeby analizy termicznej przyjęto, że kadłub oraz tarcza łożyskowa wykonane są z odlewniczego stopu aluminium, płaszcz zewnętrzny ze stali nierdzewnej, natomiast pakiet stojana z blach elektrotechnicznych, a uzwojenie z miedzi. Pełne zestawienie parametrów materiałowych przypisanych poszczególnym elementom modelu numerycznego zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny modelu 3D do analizy termicznej z 7 równoległymi kanałami pierścieniowymi

Tabela 1. Parametry materiałowe przypisane do poszczególnych komponentów w modelu numerycznym [3-4]

L.p.	Parametr materiałowy	Oś	Komponent modelu numerycznego silnika				
			kadłub/ tarcza łoż. (aluminium)	pakiet stojana	uzwojenie	płaszcz zewnętrzny (stal nierdzewna)	woda
1.	gęstość (ρ)	X,Y,Z	2823 kg/m ³	7833 kg/m ³	7939 kg/m ³	8000 kg/m ³	1000 kg/m ³
2.	przewodność cieplna (λ)	X	142 W/mK	3 W/mK	290 W/mK	15 W/mK	0,6 W/mK
		Y		28 W/mK	0,5 W/mK		
		Z		28 W/mK	0,5 W/mK		
3.	ciepło właściwe (C_w)	X,Y,Z	963 J/kgK	465 J/kgK	380 J/kgK	500 J/kgK	4182 J/kgK
4.	emisyjność (ϵ)	X,Y,Z	0,4	0,3	0,6	0,54	1
5.	lepkość dynamiczna (η)	X,Y,Z	-	-	-	-	0,001003 Pa·s



Rys. 3. Powierzchnie oporu cieplnego (zaznaczone na czerwono): a) pomiędzy uzwojeniem a pakietem blach, b) pomiędzy zalewą z żywicy a uzwojeniem oraz powierzchnią wewnętrzną kadłuba, c) pomiędzy zalewą z żywicy oraz pakietem blach a powierzchnią wewnętrzną kadłuba

Ponadto, na powierzchniach kontaktu pomiędzy elementami modelu numerycznego założono opory cieplne wynikające z założonej konstrukcji i technologii wykonania silnika (rys. 3).

Wartości oporów cieplnych na poszczególnych powierzchniach styku wyliczono na podstawie metodologii przedstawionej w pracy [5]. Powierzchniami, w których założono występowanie oporu cieplnego to:

- powierzchnie styku uzwojenia oraz żłobka pakietu stojana, na których umieszczona jest izolacja żłobkowa. Powierzchniom przypisano wartość oporu cieplnego $R_{izol}=0,00092 \text{ m}^2\text{K/W}$.

- powierzchnie styku pakietu blach stojana z powierzchnią wewnętrzną kadłuba, a także powierzchnie styku żywicy epoksydowej z uzwojeniem oraz powierzchnią wewnętrzną kadłuba. Powierzchniom przypisano wartość oporu cieplnego $R_{wscisku} = 0,0006 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Obliczenia numeryczne były prowadzone dla stanu ustalonego przy założeniu następujących wymuszeń:

- w modelu numerycznym silnika elektrycznego założono występowanie 2 źródeł ciepła wynikających ze strat mocy: w uzwojeniu oraz w pakiecie blach stojana. W tych elementach modelu założono straty mocy o wartości całkowitej odpowiednio 2000W oraz 5000W. Mechaniczne straty mocy (np. w łożyskach) pominięto.

- przyjęto przepływ cieczy chłodzącej o wartości 6 l/min na wejściu kanału doprowadzającego ciecz chłodzącą oraz założono temperaturę cieczy na wejściu oraz temperaturę otoczenia równą 25°C.

Obliczenia numeryczne prowadzono w systemie Autodesk Simulation Multiphysics 2013.

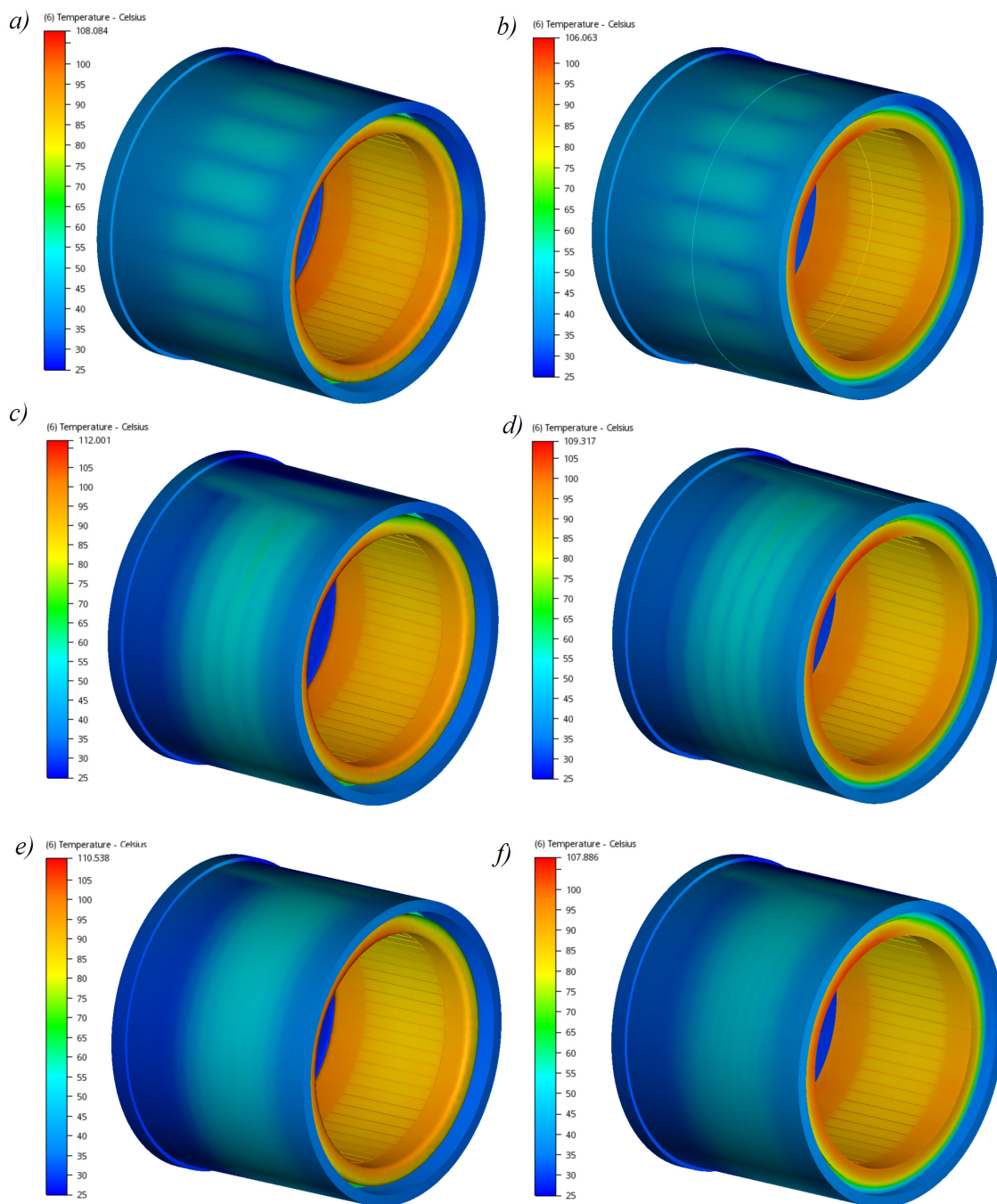
4. Wyniki obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń numerycznych efektywności chłodzenia poszczególnych wariantów konstrukcyjnych kadłuba przedstawiono na rys. 4 (a-f) oraz w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie maksymalnej temperatury w modelu numerycznym dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych kadłuba

Wariant konstrukcyjny	Temp. maksymalna
1	108,0°C
2	106,0°C
3	112,0°C
4	109,3°C
5	110,5°C
6	107,8°C

Najmniejszą temperaturę maksymalną równą 106,063°C w stanie ustalonym uzyskano dla modelu kadłuba z pojedynczym kanałem spiralnym i zalewą z żywicy epoksydowej. Nieco większą temperaturę maks. (107,886°C) uzyskano dla modelu kadłuba z 12 pierścieniowymi kanałami i zalewą z żywicy. Najgorsze wyniki uzyskano dla modelu kadłuba z 7 kanałami pierścieniowymi, co w połączeniu z analizą rozkładu temperatury na obwodzie kadłuba wskazuje, że liczba kanałów chłodzących jest niewystarczająca.



Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych dla poszczególnych wariantów konstrukcyjnych kadłuba: a) z pojedynczym kanałem spiralnym (wariant 1), b) z pojedynczym kanałem spiralnym i zalewą z żywicy (wariant 2), c) z układem 7 równoległych kanałów spiralnych (wariant 3), d) z układem 7 równoległych kanałów spiralnych i zalewą z żywicy (wariant 4), e) z układem 12 równoległych kanałów spiralnych (wariant 5), f) z układem 12 równoległych kanałów spiralnych i zalewą z żywicy (wariant 6)

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, że zastosowanie zalewy z żywicy epoksydowej pozwala istotnie obniżyć maksymalną temperaturę silnika elektrycznego w stanie ustalonym. W analizowanych modelach numerycznych temperaturę maksymalną obniżono o 2-3⁰C w porów-

naniu do modeli bez zalewy. Wynika to z lepszego odprowadzania ciepła z czół uzwojenia do układu chłodzenia w kadłubie.

5. Podsumowanie

Symulacje numeryczne MES oraz CFD pozwalają porównać wydajność chłodzenia różnych wariantów konstrukcyjnych kadłuba silnika elektrycznego na etapie projektowania. Mimo, że do wykonania dokładnych analiz termicznych niezbędne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych pozwalających na walidację modelu numerycznego, to wykonanie szeregu analiz numerycznych opartych na prostych założeniach przy \dot{m} identycznych wymuszeniach również jest cenną informacją dla konstruktora przy doborze kształtu geometrycznego oraz wymiarów układu chłodzenia kadłuba. Pozwala to ocenić, który wariant konstrukcyjny będzie charakteryzował się najlepszą wydajnością odprowadzania ciepła.

6. Literatura

- [1]. Król E., "Emisja zanieczyszczeń pojazdów z napędem elektrycznym" *Masz. Elektr. - Zesz. Probl.*, nr 3 (111), str. 211–216, 2016.
- [2]. Będkowski B., Madej J., "Analiza wydajności różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia silnika elektrycznego do zabudowy w kole" *Masz. Elektr. - Zesz. Probl.*, nr 1 (117), str. 33–38, 2018.
- [3]. Siesing L., Reinap A., Andersson M., "Thermal properties on high fill factor electrical windings: Infiltrated vs non infiltrated", *IEEE*, Berlin, 2014, s. 2218-2223.
- [4]. Będkowski B., Madej J., "Obliczenia cieplne wirujących maszyn elektrycznych - problemy modelowania", *Masz. Elektr. - Zesz. Probl.*, Nr 2 (114), str. 161-168, 2017.
- [5]. Cyganik Ł., Król E., Baranowski J., Drabek T., Dziwiński T., Piątek P., "Analiza termiczna obudowy silnika do zakrętarki elektromechanicznej", *Masz. Elektr. - Zesz. Probl.*, Nr 1 (117), str. 39-44, 2018.