

Mikołaj Taberski*, Adam Klos*, Damian Cieślak*,
Piotr Kisielewski**, Maciej Gwoździewicz***

*PUT Solar Dynamics, **KISIELEWSKI Sp. z o. o., ***Politechnika Wroclawska, Wrocław

POJAZD ELEKTRYCZNY Z NAPĘDEM BEZPOŚREDNIM

ELECTRIC VEHICLE WITH DIRECT DRIVE

Streszczenie: Artykuł przedstawia projekt pojazdu elektrycznego z napędem bezpośrednim. Silniki elektryczne typu BLDC są umieszczone w piastach kół napędowych.

Abstract: The article deals with project of electric vehicle with direct drive. BLDC motors are mounted in driven wheel hubs.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, silnik BLDC, silnik montowany w piaście

Keywords: electric vehicle, BLDC motor, wheel hub motor

1. Wstęp

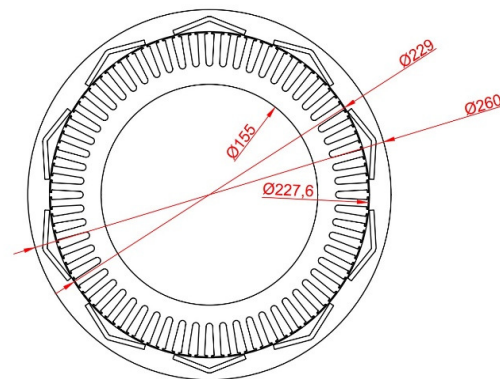
Klasyczny elektryczny układ napędowy pojazdu [silnik elektryczny – przekładnie – oś napędzana] jest najprostszym rozwiązaniem stosowanym w drogowych elektrycznych środkach lokomocji. Wadą tego rozwiązania jest sprawność przekładni, która znacząco obniża sprawność całego układu napędowego. W przypadku stosowania silników elektrycznych wysokoobrotowych [$n \approx 10\,000$ obr/min], które dodatkowo zawierają przekładnię planetarną obniżającą prędkość obrotową wału napędzającego mechanizm różnicowy, efekt obniżenia sprawności całego układu napędowego staje się jeszcze wyraźniej widoczny. Alternatywą dla ww. rozwiązania jest silnik elektryczny montowany bezpośrednio w piaście koła napędowego. Taka konstrukcja zapewnia najwyższą sprawność całego układu napędowego, z powodu wyeliminowania przekładni, ale zwiększa nieamortyzowaną masę pojazdu.

2. Konstrukcja pojazdu elektrycznego

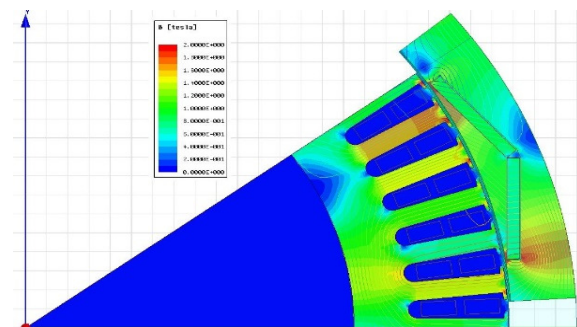
2.1. Silnik BLDC

W programie Ansys Maxwell zbudowano model połowy trójfazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z zewnętrznym wirnikiem, o mocy znamionowej $P_n=2$ kW i mocy maksymalnej $P_{max}=5$ kW (rys. 1). Ze względu na wymaganą prędkość znamionową $n_n=700$ obr/min, założono liczbę biegunów $2p=10$ i częstotliwość znamionową $f_n=60$ Hz. Magnesy trwałe neodymowe ułożono w zewnętrznym wirniku w kształcie litery V celem odpowiedniego ukształtowania prozkładu indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej.

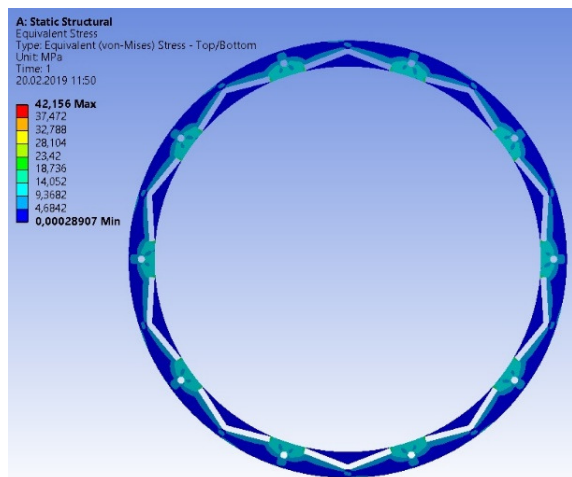
Dwuwarstwowe uzwojenie wewnętrznego stojana tworzą cewki koncentryczne wykonane z drutu okrągłego o podwójnej emalii. Oprócz obliczeń elektromagnetycznych wykonano również w pakiecie Ansys obliczenia mechaniczne. Rozkład indukcji w silniku przy obciążeniu znamionowym pokazano na rys. 2. Analizę naprężeń mechanicznych w wirniku przy momencie obciążenia $M_{obc}=M_{max}$ i prędkości obrotowej $n=n_{max}$ przedstawiono na rys. 3.



Rys. 1. Przekrój silnika do napędu pojazdu



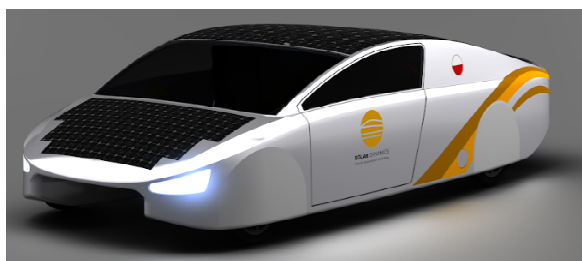
Rys. 2. Rozkład indukcji magnetycznej w silniku dla obciążenia znamionowego



Rys. 3. Analiza naprężeń mechanicznych w wirniku przy $M_{obc} = M_{max}$ i $n = n_{max}$

2.2. Bryła samochodu

Nadwozie samochodu solarnego zaprojektowano mając na uwadze aspekty bezpieczeństwa, ergonomii oraz aerodynamiki. Dodatkowym ograniczeniem projektowym była konieczność uzyskania jak największej powierzchni przeznaczonej do montażu paneli solarnych. Zwrócono również uwagę na walory estetyczne pojazdu, wpisujące się w kanony pojazdów powszechnie obserwowanych na drogach.



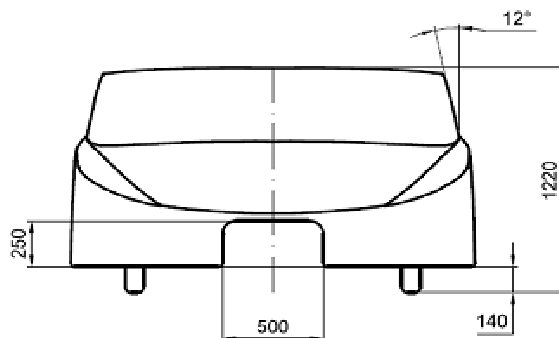
Rys. 4. Bryła samochodu solarnego

Jednym z celów projektowych była redukcja siły oporu aerodynamicznego, generującego straty energii w ruchu. Wartość siły oporu opisana wzorem:

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho A v^2$$

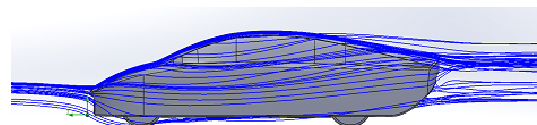
zależy między innymi od bezwymiarowego współczynnika oporu powietrza oraz powierzchni czołowej auta. Są to wielkości, które można korygować poprzez zmiany kształtu pojazdu. W celu uzyskania jak najniższej wartości współczynnika oporu bryła pojazdu została zaprojektowana w taki sposób, aby przepływ powietrza wokół niej był jak najbardziej laminarny. Zastosowano łagodne przejścia po-

między kolejnymi obszarami karoserii redukując tym samym możliwość powstawania zawirowań powietrza generujących opory ruchu. Siły oporu aerodynamicznego zmniejszono dodatkowo poprzez zastosowanie tunelu aerodynamicznego przebiegającego w dolnej części auta. Rozwiązanie to pełni dwojaką funkcję. Poza zmniejszaniem powierzchni czołowej pojazdu służy dodatkowo, jako dyfuzor zapewniający przyczepność auta do podłoża przy większych prędkościach.



Rys. 5. Główne wymiary samochodu

Symulacje komputerowe CFD przeprowadzone z wykorzystaniem programu SolidWorks Flow-Simulation wykazały, iż zaprojektowana bryła pojazdu cechuje się współczynnikiem oporu C_x rzędu 0,14. Zaobserwowane zawirowania powietrza wokół karoserii okazały się niewielkie. Jest to wynik zadowalający, niemniej ze względu na przybliżony charakter symulacji należy podejść do niego z pewną rezerwą. Zaimplementowany model cechował się bowiem idealnie gładkimi ścianami, co nie odzwierciedla rzeczywistej sytuacji.



Rys. 6. Symulacja aerodynamiczna

Nadwozie jest konstrukcją samonośną. Składa się łącznie z 10 elementów, w skład których wchodzi część górna i dolna właściwej konstrukcji nośnej, para drzwi, dwie pary osłon kół, kłapa bagażnika oraz maska. Wszystkie wymienione elementy wykonane zostaną z laminatu węglowego o konstrukcji przekładkowej. Jako materiał przekładkowy wykorzystane zostaną płyty z pianek poliuretanowych o gęstościach 50-200 kg/m³. Za wytrzymałość konstrukcji odpowiadać będzie kompozyt tkanin z włókna węglowego oraz żywicy epoksydowej. Do

wzrostu wytrzymałości konstrukcji przyczyniają się przetłoczenia wykonane z pianek poliuretanowych, pełniące po wzmocnieniu laminatem węglowym funkcję podłuznic. Większość wcześniej wspomnianych elementów nadwozia wykonana zostanie metodą infuzji, pozwalającą na redukcję masy wykonanych elementów. Takie rozwiązanie pozwoli uzyskać lekką i jednocześnie bardzo wytrzymałą konstrukcję. Przewidywana masa konstrukcji samonośnej wyniesie ok. 250 kg.

2.3. Układ zasilania i sterowania

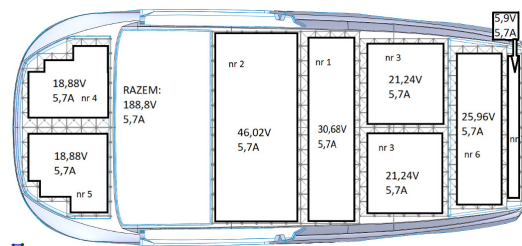
Sterowanie napędem, ze względu na specyfikę opracowanej maszyny elektrycznej jest specjalizowane. Zarówno część sprzętową, jak i algorytm oraz jego implementację prototypuje dział elektryczny. Na własne potrzeby został skonstruowany falownik oraz jest badana sprawność w przypadku różnych metod sterowania. Akumulator składa się z 28 szeregowo połączonych pakietów po 60 ogniw firmy Samsung, model INR18650-35E. Maksymalne napięcie akumulatora to 117,6 – 120 V oraz minimalne 74,2 V. Maksymalny prąd ładowania będzie wynosił 120 A, lecz przy dozwolonym w regulaminie prądzie 30 A czas pełnego ładowania wyniesie 13,6 h. Waga całego akumulatora bez okablowania i taśmy do zgrzewania to 84 kg.



Rys. 7. Akumulator

2.4. Ogniwa fotowoltaiczne

Na dachu pojazdu znajdzie się 5 m² paneli fotowoltaicznych, zdolnych do generowania mocy 1 kW. Zostaną one podzielone na 5 sekcji, dzięki czemu cały zespół paneli osiąga 188,8 V oraz 5,7 A.

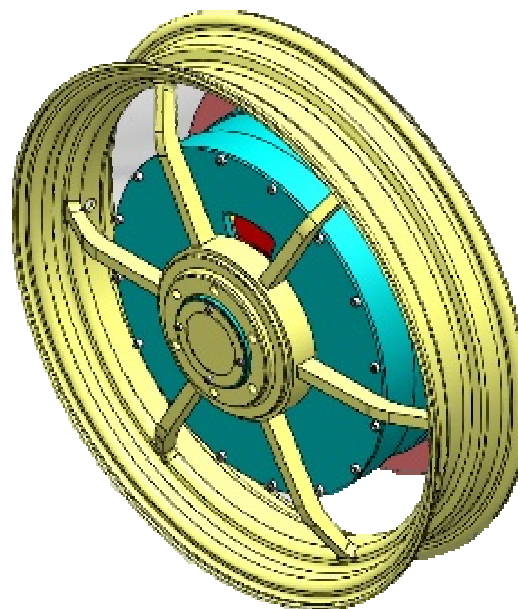


Rys. 8. Rozmieszczenie paneli fotowoltaicznych

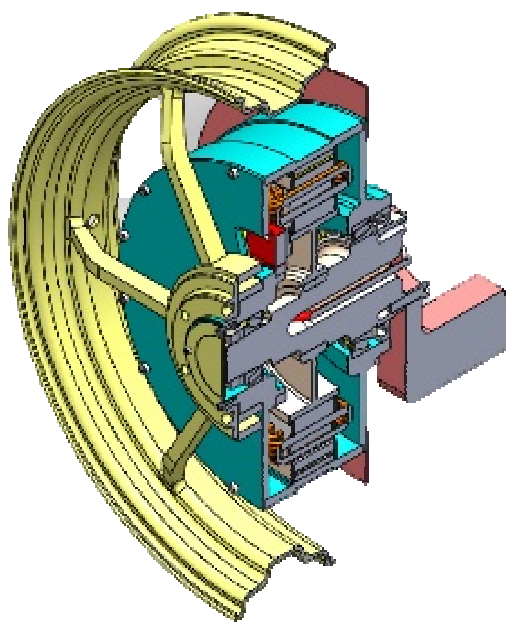
3. Produkcja silnika

Zaprojektowany silnik składa się z nieruchomej części wewnętrznej – stojana zawierającego uzwojenie oraz z wirującej części zewnętrznej – wirnika zawierającego magnesy trwałe. Część zewnętrzna jest połączona bezpośrednio z felgą samochodu. Model silnika oraz jego przekrój przedstawiono na rys. 9 i 10. Po wykonaniu dokumentacji wyprodukowano części składowe silnika używając nowoczesnych maszyn CNC do obróbki skrawaniem oraz cięcia laserowego. Na rys. 11 przedstawiono tarczę łożyskową oraz piasty silników. Wykonane detale zostały poddane pomiarom na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (rys. 13).

Pakiet stojana bez uzwojenia przedstawiono na rys. 14. Rysunek 12 przedstawia pakiet stojana w trakcie uzwojania.



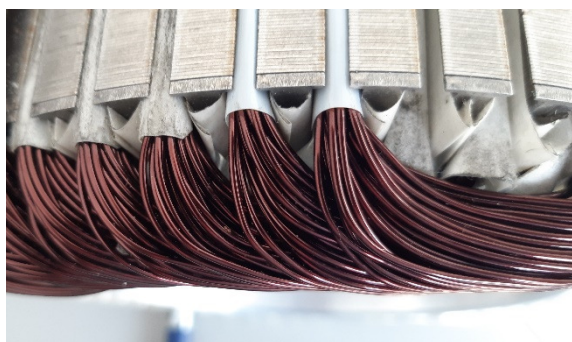
Rys. 9. Model 3D silnika elektrycznego z napędem bezpośrednim



Rys. 10. Przekrój modelu 3D silnika elektrycznego z napędem bezpośrednim



Rys. 11. Tarcza łożyskowa i piasty silników



Rys. 12. Stojan w trakcie uzwojania



Rys. 13. Piasta silnika – pomiar współrzędnościową maszyną pomiarową



Rys. 14. Pakiet stojana

4. Podsumowanie

Bez wątpienia głównym napędem pojazdów obecnego stulecia staną się silniki elektryczne. Aktualnie największym problemem jest zasięg, który można zwiększyć m.in. przez dodatkowe ogniwa fotowoltaiczne umieszczone na dachu. Poza tym poprawa sprawności całego układu napędowego wpływa na maksymalny dystans eksploatowanego środka lokomocji – pod tym względem silnik elektryczny umieszczony w piaście kół napędzanych jest najlepszym rozwiązaniem.

Obliczenia wykonano na komputerach Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Super-komputerowego (<http://www.wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 400

5. Literatura

- [1]. P. Dukalski, T. Wolnik, B. Będkowski, T. Jarek, A. Urbaś, K. Augustynek, „Analiza pracy silnika zabudowanego w piaście koła samochodu osobowego dla wybranych parametrów jazdy”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1/2018 (117)
- [2]. E. Król, „Silniki Elektryczne w Napędach Pojazdów Sportowo-Rekreacyjnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2014 (102)

[3]. L. Jian, „Research Status and Development Prospect of Electric Vehicles Based on Hub Motor”, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2018)*

[4]. R. Gabor, P. Mynarek, M. Kowol, „Koncepcja i obliczenia parametrów przełączalnego silnika reaktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu roweru”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/2017 (93)

[5]. www.zf.com

[6]. www.tm4.com

[7]. www.brusa.biz

[8]. www.cnqsmotor.com