

## Zelektryfikowany samochód dostawczy o masie do 3,5 t jako platforma badawcza hybrydowego napędu z silnikami w piastach kół

**Streszczenie.** Artykuł opisuje modyfikację spalinowego pojazdu dostawczego o masie do 3,5 t w pojazd hybrydowy z dwoma silnikami w kołach. Szczegółowo opisano rozmieszczenie elektrycznych komponentów na pojeździe oraz zmiany wprowadzone w układzie zawieszenia. Przedstawiona została elektryczna jednostka napędowa wraz z parametrami maksymalnymi. Dynamika pojazdu podczas pracy elektrycznego napędu została zasymlowana w cyklu miejskim Artemis Urban. Wyniki momentu obrotowego, strat generowanych przez silnik oraz temperatury uzwojenia podczas cyklu miejskiego przedstawiono na wykresach. Dalsze prace nad pojazdem oraz wnioski z dotychczasowo otrzymanych prac zostały przedstawione w podsumowaniu.

**Abstract.** The article describes the modification of a ICE delivery vehicle weighing up to 3.5 tons into a hybrid vehicle with two wheel hub motors. The arrangement of electrical components on the vehicle and the changes made to the suspension system were described in detail. The electric drive unit with its maximum parameters is presented. The dynamics of an electric vehicle were simulated in the Artemis Urban cycle. The results of torque, motor losses and winding temperatures during the urban cycle are presented in graphs. Further work on the vehicle and conclusions from the work received so far are presented in a summary. (**An electrified delivery vehicle weighing up to 3.5 t as a research platform for a hybrid drive with wheel hub motors**).

**Słowa kluczowe:** elektryfikacja pojazdu, silnik w kole, elektromobilność, maszyny elektryczne.

**Keywords:** vehicle electrification, wheel hub motor, electromobility, electric machines.

### Wstęp

Dynamiczny rozwój elektromobilności wymusza coraz większy zakres wymagań stawianych napędom do pojazdów elektrycznych, co skutkuje poszukiwaniem nowych konstrukcji i topologii układów napędowych.

Jednym z charakterystycznych rozwiązań jest napęd z silnikami w piastach koła, którego zastosowanie pozwala na eliminację elementów pośredniczących w przenoszeniu momentu obrotowego. Dla tego typu silników prowadzone są prace badawcze nad różnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi [1–6] i metodami projektowania [7–10].

Zastosowanie kompaktowych silników w piastach kół w branży motoryzacyjnej, ze względu na warunki pracy i lokalizację, stanowi wyzwanie dla projektowania silników oraz technologii produkcji, związanych z wytrzymałością mechaniczną, uszczelnieniem, koncepcją systemu chłodzenia oraz sterowaniem [11–15]. Jednym z częściej poruszanych problemów w przypadku silników do zabudowy w piastach kół jest duża masa nieresorowana. Silniki zamontowane w samochodzie w ten sposób stanowią dodatkową masę nieresorowaną, co ma negatywny wpływ na eksploatację elementów układu amortyzującego oraz na sterowność pojazdu [16–21].

Publiczne badania i wnioski sugerują, że w zależności od pojazdu i stosunku masy nieresorowanej i resorowanej, korzystanie z tego rodzaju rozwiązania przy prowadzeniu pojazdu jest nieodczuwalne dla przeciętnego kierowcy. Zarówno badania przeprowadzone przez autorów projektu, jak i inne publikacje wskazują, że wpływ odpowiednio zmniejszonej masy nieresorowanej silników może zostać zrekompensowany poprzez pewne zmiany w strukturze systemu amortyzacji. Rozwiązanie to oferuje szereg możliwości związanych z modułowością tego typu napędów. Można opracowywać pojazdy z napędem na 2, 4 koła lub więcej.

Napędy tego typu mogą znaleźć zastosowanie w najróżniejszych produktach przemysłowych, takich jak samochody osobowe, autobusy, transportery górnicze, pojazdy bezzałogowe dla służb mundurowych i łaziki kosmiczne. Silniki tego typu cieszą się nie tylko zainteresowaniem naukowym, ale także dla podmiotów gospodarczych [22–26].

W Sieci Badawczej Łukasiewicz – Górnośląskim Instytucie Technologicznym (Łukasiewicz-GIT) realizowany jest projekt, który ma na celu zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie m.in. w warunkach laboratoryjnych i drogowych, napęd bezpośredni z silnikami w piastach kół samochodu hybrydowego. Opracowywany napęd zakłada wykorzystanie dwóch silników elektrycznych, zamontowanych na tylnej osi napędowej samochodu. Opracowany napęd elektryczny ma współtworzyć z oryginalnym silnikiem spalinowym napęd hybrydowy.

Jako pojazd testowy wybrano pojazd o masie do 3,5 t Fiat Ducato.

Zgodnie z założeniami pojazd powinien mieć możliwość poruszania się w terenie miejskim i podmiejskim z prędkością do 90 km/h, wykorzystując wyłącznie elektryczny układ napędowy.

### Rozmieszczenie komponentów

W trakcie projektowania rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych elementów składowych pojazdu, kierowano się założeniem zachowania maksymalnej ilości fabrycznych elementów pojazdu bazowego. Takie podejście projektowe znacząco ogranicza koszty, które wynikłyby z konieczności projektowania nowych rozwiązań oraz pozwala na zachowanie sprawdzonych, seryjnie produkowanych elementów, co pozytywnie przekłada się na bezawaryjność i bezproblemowe serwisowanie pojazdu po konwersji.

W trakcie projektu podjęto decyzję o umieszczeniu elementów napędu elektrycznego w tylnej części pojazdu, możliwie blisko tylnej osi przy zachowaniu poprawnego rozłożenia mas. Natomiast elementy współpracujące pośrednio z silnikiem spalinowym, takie jak: elektryczna pompa podciśnienia układu hamulcowego, elektryczny kompresor klimatyzacji oraz podgrzewacz wnętrza, umieszczono w przedniej części pojazdu w sposób minimalizujący ewentualne modyfikacje osprzętu silnika spalinowego.

Elementy związane z magazynowaniem i przetwarzaniem energii elektrycznej zlokalizowano w przedniej części przestrzeni ładunkowej pojazdu. Kompresor klimatyzacji, pompę podciśnienia oraz podgrzewacz wysokonapięciowy umieszczono w przedniej

części pojazdu blisko pasa przedniego. Falowniki umieszczone zostały możliwie blisko tylnej osi z silnikami elektrycznymi, natomiast układ chłodzenia znajduje się pod podwoziem pojazdu. Rozmieszczenie komponentów związanych z elektryfikacją pojazdu przedstawiono na rys. 1 oraz rys. 2.



Rys.1. Rozmieszczenia komponentów - widok z boku

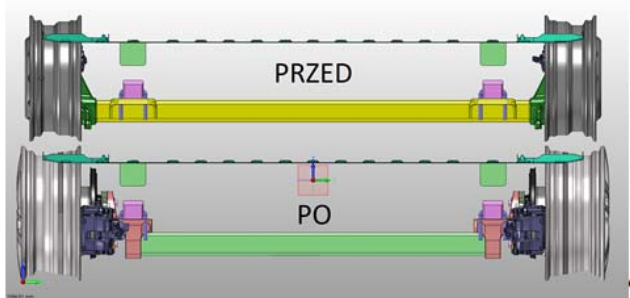


Rys.2. Rozmieszczenia komponentów - widok z góry

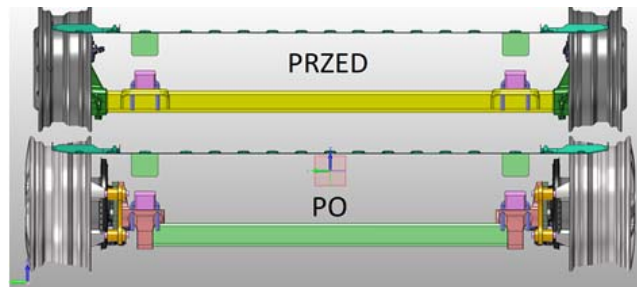
### Zabudowa układu napędowego

Układ napędowy pojazdu składa się z oryginalnego napędu spalinowego napędzającego przednią oś pojazdu oraz elektrycznego układu napędowego napędzającego tylną oś pojazdu. Ze względu na ograniczoną przestrzeń na zabudowę silników elektrycznych, konieczne było przekonstruowanie tylnego zawieszenia w sposób umożliwiający przeniesienie układu hamulcowego bliżej środka pojazdu.

W celu umożliwienia montażu silników elektrycznych przeprojektowano tylną belkę w sposób pozwalający na wykorzystanie jak największej ilości fabrycznych elementów zawieszenia i elementów układu hamulcowego. Przeprojektowano mocowanie resora do belki, mocowanie czopu koła oraz zacisku hamulcowego. Zaciski hamulcowe zamieniono stronami względem oryginalnego rozwiązania oraz obrócono o kąt 180° względem osi obrotu koła. Pozostawiono mechanizmy hamulca ręcznego oraz czujniki prędkości obrotowej kół. Ze względu na konieczność wygospodarowania przestrzeni na przeniesiony układ hamulcowy, przeniesieniu uległy mocowania amortyzatorów tylnego zawieszenia.



Rys.3. Widok od tyłu pojazdu przedstawiający wprowadzone modyfikacje zawieszenia



Rys.4. Widok od przodu pojazdu przedstawiający wprowadzone modyfikacje zawieszenia

Po przesunięciu układu hamulcowego bliżej osi pojazdu, konieczne było podniesienie całego zawieszenia pojazdu, tak aby uniknąć kolizji układu hamulcowego z karoserią pojazdu. Tylnie zawieszenie zostało podniesione poprzez zmianę konstrukcji mocowania koła, natomiast przednie zawieszenie zostało podniesione poprzez zaprojektowanie i wykonanie podkładek kolumn McPhersona.

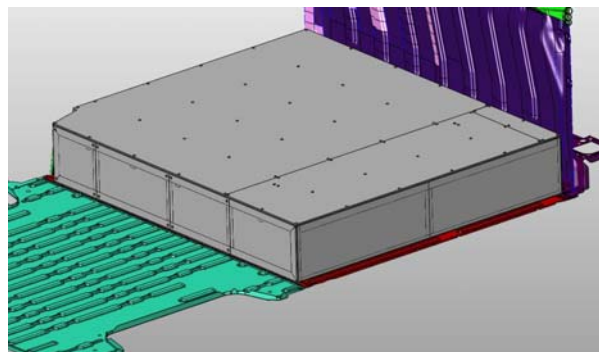
Łączne przesunięcie płaszczyzny mocowania czopu koła do środka pojazdu względem oryginalnego rozwiązania wynosi 123mm.

### Zabudowa przestrzeni ładunkowej i falowników

Ze względu na ograniczone miejsce w pojeździe na montaż elementów elektrycznego układu napędowego, częściowo wykorzystano przestrzeń ładunkową pojazdu. W tym celu wykonano obudowę osłaniającą komponenty napędu elektrycznego od pozostałej przestrzeni ładunkowej.

W wykonanej zabudowie umieszczono:

- baterię trakcyjną,
- ładowarkę baterii,
- przetwornicę DC/DC,
- power box,
- sterownik pojazdu,
- zespół bezpieczników.



Rys.5. Widok zabudowy w przestrzeni ładunkowej - wizualizacja

Zabudowa w celu ograniczenia wagi wykonana została z aluminium. Zewnętrzna pokrywa ramy od strony drzwi bocznych przesuwanych pojazdu wyposażona została w mechanizm zawiasowy pozwalający na łatwy dostęp do instalacji elektrycznej pojazdu w celach serwisowych. Bateria trakcyjna zamontowana została bezpośrednio do karoserii pojazdu, natomiast pozostałe elementy przykręcone są do ramy zabudowy. Pomiędzy zabudową przestrzeni ładunkowej, a podwoziem pojazdu zabudowano płytę pozwalającą na montaż złącz wysoko i niskonapięciowych od strony podwozia.

Falowniki silników napędowych, ze względu na konieczność maksymalnego ograniczenia długości przewodów zasilających umiejscowione zostały możliwie blisko tylnej osi, w miejscu koła zapasowego.



Ładowarka Przetwornica DC/DC Power Box Rozdzielnia 12V Sterownik pojazdu

Rys.6. Widok rozmieszczenia elementów wewnątrz obudowy w przestrzeni ładunkowej



Rys.7. Widok gniazd zlokalizowanych pod podwoziem pojazdu



Rys.8. Widok mocowania falowników pod podwoziem (na zdjęciu widać zamontowany tylko jeden falownik)

### Instalacja wysokonapięciowa

Instalacja wysokonapięciowa (400VDC) została rozlokowana w dwóch częściach pojazdu: przestrzeń ładunkowa oraz podwozie. Połączenie między nimi zapewniają złącza wysokonapięciowe umieszczone w podłodze przestrzeni ładunkowej.

W obszarze podwozia zostały poprowadzone przewody zasilające falowniki trakcyjne, nagrzewnicę wnętrza oraz kompresor klimatyzacji.

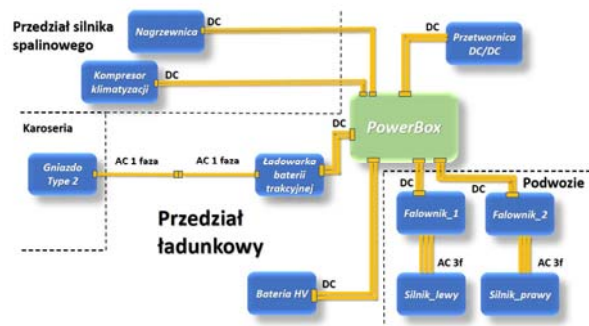
W obszarze przestrzeni ładunkowej umieszczono rozdzielnicę HV (PowerBox) wraz z bezpiecznikami, ładowarkę baterii trakcyjnej, przetwornicę DC/DC oraz baterię trakcyjną.

### Instalacja niskonapięciowa

Instalacja niskonapięciowa (12VDC) została podzielona na 4 sekcje:

- silnika spalinowego,
- kabiny,
- podwozia,
- przedziału ładunkowego.

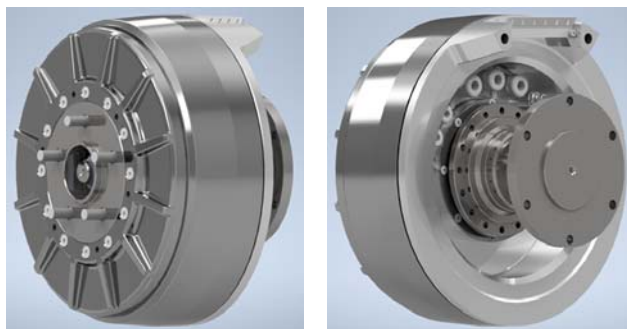
Podział wiązki niskonapięciowej na sekcje umożliwia rozłączenie i demontaż w celach serwisowych tylko jednej części bez konieczności ingerencji w pozostałe.



Rys.9. Schemat połączeń instalacji wysokiego napięcia

### Silnik napędowy

Silnik napędowy został zaprojektowany i wykonany w Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych Łukasiewicz-GIT. Gabarytowo silnik wypełnia całą przestrzeń felgi o średnicy 17". Obwód elektromagnetyczny silnika wykonano z 54 żłobkami w stojanie oraz 48 biegunami magnetycznymi w wirniku. Silnik przystosowano do chłodzenia cieczą. Uzwojenie silnika jest uzwojeniem dwuwarstwowym z cewkami skupionymi nawijanymi maszynowo. Takie wykonanie cewek skraca wysięg czoł uzwojenia, co przyczynia się do mniejszych strat mocy w uzwojeniu silnika. Dodatkowo w celu minimalizacji strat mocy wykonano segmentację magnesów w kierunku osiowym. W silniku trakcyjnym, zwłaszcza konstrukcji kompaktowej, ograniczonej gabarytowo istotne jest obliczanie strat mocy, ponieważ ich wartość głównie zmienia się w zależności od natężenia prądu oraz częstotliwości.



Rys.10. Model 3D silnika SMzs200S48 opracowanego w Sieci Badawczej Łukasiewicz Górnośląski Instytut Technologiczny

Tabela 1. Wybrane parametry silnika

| Parametr                               | Wartość | Jednostka |
|--|---------|-----------|
| Moc maksymalna $P_{max}$               | 90      | kW        |
| Napięcie zasilania $U_{dc}$            | 400     | V         |
| Prąd maksymalny $I_{max}$              | 420     | A         |
| Moment maksymalny $T_{m,max}$          | 2300    | Nm        |
| Prędkość obrotowa maksymalna $n_{max}$ | 1200    | obr/min   |

W tabeli 1 przedstawiono wybrane parametry silnika. Silnik przy parametrach maksymalnych pracuje przy gęstości prądu ok.  $j=17 \text{ A/mm}^2$ . Układ chłodzenia przy chwilowej pracy silnika z parametrami maksymalnymi może mieć trudności z odprowadzeniem tak dużej ilości ciepła.

Parametry elektromagnetyczne oraz termiczne silnika zostaną sprawdzone poprzez cykl miejski Artemis Urban.

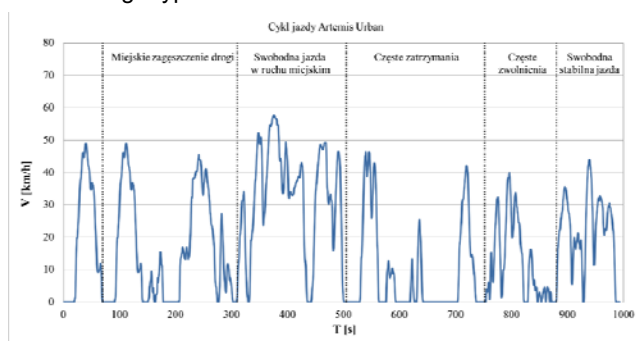
### Symulacje pracy w cyklu miejskim Artemis Urban

Do przeprowadzenia analizy termicznej podczas jazdy samochodu wykorzystano moduł Lab programu Ansys Motor-CAD, który pozwala na przeprowadzenie symulacji na sprzęgniętych modelach obwodu elektromagnetycznego oraz modelu termicznego. W trakcie symulacji można zadać wymagany cykl jezdny samochodu oraz za pomocą szeregu parametrów zbudować model pojazdu. Program na podstawie wymagań odnośnie prędkości pojazdu w cyklu jazdy oblicza zapotrzebowanie na moment obrotowy dla modelu pojazdu. Obliczenia można przeprowadzić uwzględniając sprzężenie z modelem cieplnym. Takie obliczenia uwzględniają wpływ temperatury na parametry pracy obwodu elektromagnetycznego.

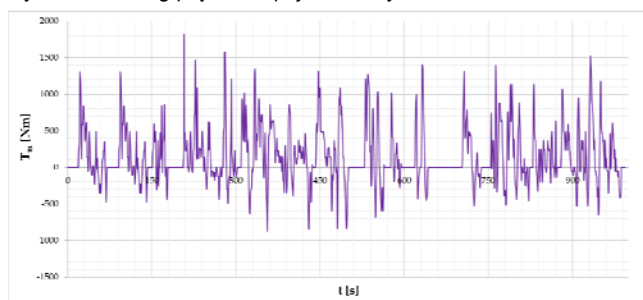
Symulacje pracy przeprowadzono dla cyklu Artemis Urban, który reprezentuje przeciętną jazdę miejską. Cykl ten można porównać do jazdy w warunkach miejskich, jakie zwykle występują w strefach zielonych, gdzie mogą jeździć tylko samochody elektryczne.

Cykl jest opisany przez prędkość pojazdu w czasie, zaprezentowany na rysunku 11.

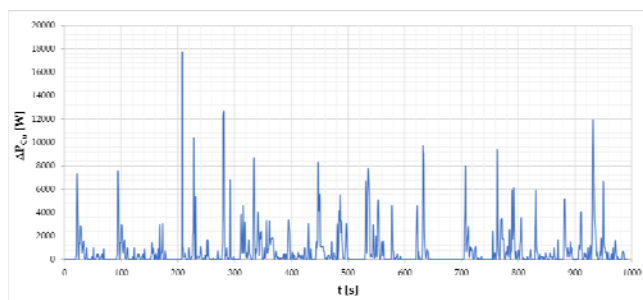
Na rysunku 12 został zaprezentowany przebieg wymaganego momentu obrotowego dla silnika elektrycznego w cyklu jazdy Artemis Urban z uwzględnieniem pełnego załadunku samochodu dostawczego typu Fiat Ducato.



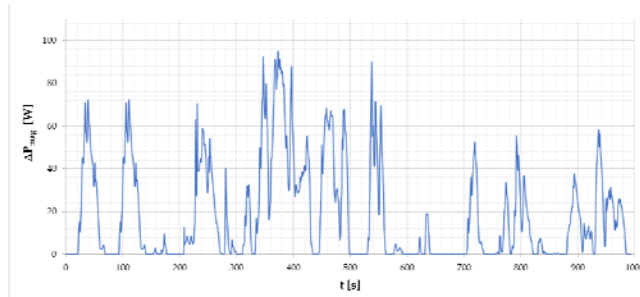
Rys.11. Przebieg prędkości pojazdu w cyklu Artemis Urban



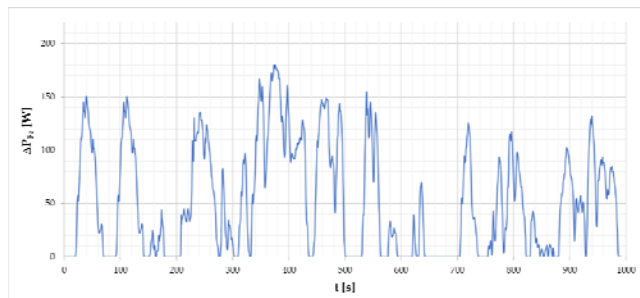
Rys.12. Obliczony przebieg momentu obrotowego silnika dla rozpatrywanego pojazdu w cyklu jazdy Artemis Urban



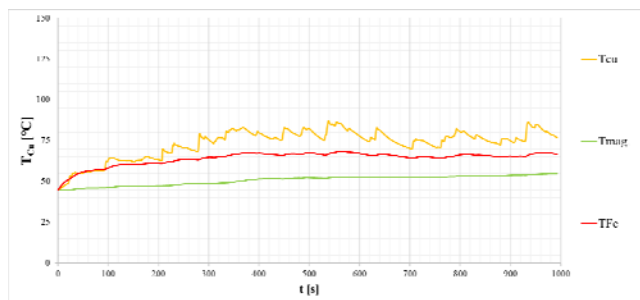
Rys.13. Obliczone straty mocy w uzwojeniu dla rozpatrywanego pojazdu w cyklu jazdy Artemis Urban



Rys.14. Obliczone straty mocy w magnesach trwałych dla rozpatrywanego pojazdu w cyklu jazdy Artemis Urban



Rys.15. Obliczone straty mocy w rdzeniu magnetycznym stojana dla rozpatrywanego pojazdu w cyklu jazdy Artemis Urban



Rys.16. Obliczone przebiegi temperatury w uzwojeniu (hot spot), w magnesach trwałych, w jarmie stojana silnika dla rozpatrywanego pojazdu w cyklu jazdy Artemis Urban

Na rysunkach rys.13, rys.14, rys.15 zostały przedstawione analogiczne przebiegi strat mocy w uzwojeniu, w magnesach trwałych i w rdzeniu magnetycznym stojana.

### Podsumowanie

Przeróbka spalinowego samochodu dostawczego o masie do 3,5t na pojazd hybrydowy z silnikami w kołach wymaga dużej ingerencji w układ zawieszenia oraz układ hamulcowy. Brak przystosowanego miejsca w zawieszeniu na elementy elektryczne wymusza umieszczenie ich w przestrzeni ładunkowej, zmniejsza możliwości załadunku pojazdu. Samochód służy jako platforma badawcza. Wykonanie hybrydowego pojazdu dostawczego od podstaw eliminuje problem pomniejszenia przestrzeni ładunkowej, poprzez uwzględnienie miejsca na komponenty elektryczne w podłodze pojazdu.

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że dla jazdy w cyklu miejskim, napięcie akumulatora  $U_{DC} = 400\text{ V}$  jest napięciem wystarczającym. Osiągane maksymalne temperatury pracy są na tyle małe, że w przypadku ograniczenia pracy napędu do rozpatrywanego cyklu i zakresu prędkości obrotowej można rozważyć skrócenie rdzenia magnetycznego silnika przy jednoczesnym zwiększeniu liczby zwojów do wartości zapewniającej niezmienny maksymalny moment obrotowy. Można także rozważyć zmniejszenie napięcia zasilania.

Kolejnym etapem prac jest jazda samochodu dostawczego w warunkach rzeczywistych. W pierwszej kolejności zostaną przeprowadzone badania na hamowni, następnie samochód zostanie sprawdzony na torze testowym, a w ostatniej kolejności samochód zostanie sprawdzony w rzeczywistych warunkach drogowych na drogach miejskich i oświatowych.

*Projekt „Polskie rozwiązania napędu elektrycznego w kołach” („4WHEED”) realizowany w Sieci Badawczej Łukasiewicz finansowany jest w ramach dotacji celowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Numer: 2/L-KOMEL/CŁ/2021.*

*Badania stanowią kontynuację projektu „Innowacyjne rozwiązania w zakresie napędu bezpośredniego pojazdów elektrycznych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER VII, zgodnie z umową: LIDER/24/0082/L-7/ 15 /NCBR/2016.*

*Badania nad silnikami w piastach kół, prowadzone przez Sieć Badawczą Łukasiewicz, otrzymały Nagrodę Naukową (nagrodę główną) - 25. Konkurs o Nagrodę Siemens dla naukowców i zespołów badawczych.*

**Autorzy:** mgr. inż. Piotr Dukalski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: piotr.dukalski@git.lukasiewicz.gov.pl; mgr. inż. Jan Mikoś, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: jan.mikos@git.lukasiewicz.gov.pl; dr hab. inż. Bartłomiej Będkowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: bartlomiej.bedkowski@git.lukasiewicz.gov.pl; dr. inż. Łukasz Cyganik, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: lukasz.cyganik@git.lukasiewicz.gov.pl; mgr. inż. Adam Litwinowicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: adam.litwinowicz@git.lukasiewicz.gov.pl; inż. Wojciech Gawron, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, ul. Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: wojciech.gawron@bosmal.com.pl; mgr. inż. Robert Tyrantia, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, ul. Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: robert.tyrantia@bosmal.com.pl; mgr. inż. Maciej Adamecki, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, ul. Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: maciej.adamecki@bosmal.com.pl; mgr. inż. Kacper Kudzia, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL, ul. Sarni Stok 93, 43-300 Bielsko-Biała, E-mail: kacper.kudzia@bosmal.com.pl;

## LITERATURA

- [1] Rahim, N.; Ping, H.; Tadjuddin, M. Design of an in-wheel axial flux brushless dc motor for electric vehicle. In Proceedings of the 2006 International Forum on Strategic Technology, Ulsan, Korea, 18–20 October 2006; pp. 16–19.
- [2] Zhu, J.; Cheng, K.E.; Xue, X.; Zou, Y. Design of a novel high-torque-density in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles. In Proceedings of the 2017 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), Dublin, Ireland, 24–28 April 2017.
- [3] Rechkemmer, S.K.; Zhang, W.; Sawodny, O. Modeling of a Permanent Magnet Synchronous Motor of an E-Scooter for Simulation with Battery Aging Model. IFAC-PapersOnLine 2017, 50, 4769–4774.
- [4] Zhu, X.; Shu, Z.; Quan, L.; Xiang, Z.; Pan, X. Design and Multicondition Comparison of Two Outer-Rotor Flux-Switching Permanent-Magnet Motors for In-Wheel Traction Applications. IEEE Trans. Ind. Electron. 2017, 64, 6137–6148.
- [5] Gao, P.; Gu, Y.; Wang, X. The Design of a Permanent Magnet In-Wheel Motor with Dual-Stator and Dual-Field-Excitation Used in Electric Vehicles. Energies 2018, 11, 424.
- [6] Bicek, M.; Lampic, G.; Zupan, S.; Obrul, B.; Gotovac, G.; Štefe, B.; Valentincic, J. HIGH TORQUE “IN-WHEEL” MOTORS FOR RESCUE VEHICLES. In Proceedings of the Innovative Automotive Technology—IAT 2012, Dolenjske Toplice, Slovenia, 12–13 April 2012.
- [7] Luo, Y.; Tan, D. Lightweight design of an in-wheel motor using the hybrid optimization method. Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 2013, 227, 1590–1602.
- [8] Shin, P.S.; Kim, H.D.; Chung, G.B.; Yoon, H.S.; Park, G.S.; Koh, C.S. Shape Optimization of a Large-Scale BLDC Motor Using an Adaptive RSM Utilizing Design Sensitivity Analysis. IEEE Trans. Magn. 2007, 43, 1653–1656.
- [9] Seo, I.M.; Kim, H.K.; Hur, J. Design and analysis of modified spoke type BLDC motor using a ferrite permanent-magnet. In Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China, 22–25 October 2014; pp. 1701–1705.
- [10] Łebkowski, A. Design, Analysis of the Location and Materials of Neodymium Magnets on the Torque and Power of In-Wheel External Rotor PMSM for Electric Vehicles. Energies 2018, 11, 2293.
- [11] Frajnkovic, M.; Omerovic, S.; Rozic, U.; Kern, J.; Connes, R.; Rener, K.; Bicek, M. Structural Integrity of In-Wheel Motors. In Proceedings of the International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, Heidelberg, Germany, 17 September 2018.
- [12] Bicek, M.; Connes, R.; Omerovic, S.; Gündüz, A.; Kunc, R.; Zupan, S. The Bearing Stiffness Effect on In-Wheel Motors. Sustainability 2020, 12, 4070.
- [13] Li, G.; Wang, Y.; Zong, C. Driving State Estimation of Electric Vehicle with Four-wheel-hub-motors. Qiche Gongcheng/Automot. Eng. 2018, 40, 150–155.
- [14] Wanner, D.; Kreußlein, M.; Augusto, B.; Drugge, L.; Stensson rigell, A. Single wheel hub motor failures and their impact on vehicle and driver behavior. Veh. Syst. Dyn. 2016, 54, 1345–1361.
- [15] Lampic, G.; Detela, A.; Valentincic, J. Management of innovative technology of Elaphe\* in-wheel. Electric motors—A case study. In Proceedings of the 9th International Conference on Management of Innovative Technologies MIT’2007, Fiesca, Slovenia, 9–10 October 2007.
- [16] Kostic Perovic, D. Making the Impossible, Possible—Overcoming the Design Challenges of In Wheel Motors. World Electr. Veh. J. 2012, 5, 514–519.
- [17] Slaski, G.; Gudra, A.; Borowicz, A. Analysis of the influence of additional unsprung mass of in-wheel motors on the comfort and safety of a passenger car. Arch. Automot. Eng.—Arch. Motoryz. 2014, 65, 51–64.
- [18] Parczewski, K.; Romaniszyn, K.; Wnęk, H. Influence of electric motors assembly in hubs of vehicle wheels on the dynamics of movement, especially on surfaces with different adhesion coefficient. Combust. Engines 2019, 179, 58–64.
- [19] Dukalski, P.; Będkowski, B.; Parczewski, K.; Wnęk, H.; Urbaś, A.; Augustynek, K. Analysis of the influence of assembly electric motors in wheels on behaviour of vehicle rear suspension system. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2018; Volume 421.
- [20] Parczewski, K.; Wnęk, H. Comparison of overcoming inequalities of the road by a vehicle with a conventional drive system and electric motors placed in the wheels. In Proceedings of the Transport Means 2020, Palanga, Lithuania, 30 September–2 October 2020.
- [21] Dukalski, P.; Będkowski, B.; Parczewski, K.; Wnęk, H.; Urbaś, A.; Augustynek, K. Analysis of the Influence of Motors Installed in Passenger Car Wheels on the Torsion Beam of the Rear Axle Suspension. Energies 2022, 15, 222.
- [22] Szewczyk, P.; Łebkowski, A. Studies on Energy Consumption of Electric Light Commercial Vehicle Powered by In-Wheel Drive Modules. Energies 2021, 14, 7524.
- [23] Available online: <http://in-wheel.com/en/> (accessed on 5 June 2022).
- [24] Available online: <https://www.ziehl-abegg.com/de/en/product-range/automotive/in-wheel-hub-motors/> (accessed on 5 June 2022).
- [25] Available online: <https://www.proteanelectric.com/> (accessed on 5 June 2022).
- [26] Available online: <https://www.lordstownmotors.com/pages/tech> (accessed on 5 June 2022).