

WYBRANE PROBLEMY KONSTRUKCJI POJAZDÓW PRZYSZŁOŚCI

pod redakcją
Mieczysława Strusia i Janusza Roguli



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2016

Publikacja współfinansowana z budżetu Województwa Dolnośląskiego



Recenzenci

Zbigniew GNUTEK, Mieczysław STRUŚ, Jacek KASPERSKI,
Janusz SKRZYPACZ, Przemysław JASZAK, Jacek LAMPERSKI,
Janusz ROGULA, Grzegorz ROMANIK, Przemysław SZULC

Opracowanie i redakcja

Janusz ROGULA
Mieczysław STRUŚ

Projekt okładki

Marcin ZAWADZKI

Wydrukowano na podstawie dostarczonych materiałów

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2016

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.książek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-945-4

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS TREŚCI

| | |
|--|-----|
| Wprowadzenie | 5 |
| Kacper BACIK, Dawid LUKOSEK, Zero Emission Car. Koncepcja elektroniki w sportowym samochodzie elektrycznym. Sterowanie oraz akwizycja danych z podzespołów | 7 |
| Kajetan BARCZAK, Daniel BRANDYK, Koncepcja lekkiego pojazdu miejskiego dla osoby niepełnosprawnej i opiekuna | 15 |
| Marcin BIEGANOWSKI, Piotr POLISZUK, Ekologiczne konstrukcje lekkie – zarys ogólny | 23 |
| Jakub BIERNACKI, Marek MYSIOR, Struktura układu napędowego pojazdu pneumatycznego <i>Pneumobil</i> | 35 |
| Daniel Marcin BRANDYK, Konstrukcja ramy nośnej pojazdu napędzanego ciekłym azotem | 43 |
| Tomasz GODLEWSKI, Zbigniew ŻELAZNY, Wojciech PAWLAK, Badania ergonomii pasażerów Lekkiego Motocykla Elektrycznego | 51 |
| Dariusz IWĄNSKI, Pozyskanie energii elektrycznej z ciepła odpadowego w pojeździe napędzanym ciekłym azotem | 59 |
| Jarosław KIJAKOWSKI, Zbigniew ŻELAZNY, Inercyjny system nawigacji w pojeździe autonomicznym | 67 |
| Piotr KONIECZNY, Tomasz GODLEWSKI, Wojciech PAWLAK, Lekki Elektryczny Motocykl. Analiza budowy prototypu pod kątem możliwości homologacyjnych pojazdu | 79 |
| Szymon KUCHARSKI, Andrzej BORAWSKI, Projekt lekkiej felgi do pojazdu na zawody Formula Student | 87 |
| Marcin KURZAŁ, Wojciech PAWLAK, Tomasz GODLEWSKI, Obciążenia statyczne oraz dynamiczne, jakim poddawana jest rama skutera elektrycznego | 101 |
| Jakub MICAŁ, Marcin ŁYP, Projekt ramy dla lekkiego motocykla elektrycznego LEM Napoli | 111 |
| Piotr MIERZWIĄK, Wigry 4 rower elektryczny – założenia oraz opis wykonanych postępów w realizacji projektu | 119 |
| Wojciech PAWLAK, Lekki Elektryczny Motocykl. Analiza porównawcza typów zawieszenia zastosowanych w LEM 2014 oraz LEM Napoli | 125 |
| Wojciech PAWLAK, Tomasz GODLEWSKI, Lekki Elektryczny Motocykl. Konstrukcja, obciążenia, zawieszenie | 133 |
| Andrzej PIETRYKA, Zbigniew ŻELAZNY, Badania ergonomii Lekkiego Elektrycznego Motocykla 2015 | 141 |
| Adam RESZEL, Zbigniew ŻELAZNY, Sensory ultradźwiękowe dla pierwszego polskiego pojazdu autonomicznego. Pomiary i ocena możliwości implementacji | 149 |
| Adam Tomasz PORĘBSKI, Rozwój konstrukcji wymiennika ciepła dla krioNgine – pojazdu zeroemisyjnego napędzanego parami uzyskanymi na skutek odparowania ciekłych gazów | 161 |
| Janusz ROGULA, Mateusz MICHALAK, Naczepa do przewozu żywego drobiu – konstrukcja z możliwością odzysku energii hamowania | 169 |
| Patrick RUTKOWSKI, Zbigniew ŻELAZNY, Konwersja BMW E36 na pojazd o napędzie elektrycznym przystosowany do jazdy w kontrolowanym poślizgu | 175 |
| Daniel SŁOMIŃSKI, Andrzej BORAWSKI, Projekt wtryskiwacza benzynowego do bolidu FSAE | 187 |
| Zbigniew ŻELAZNY, Tomasz GODLEWSKI, Obszary pokrycia systemu komunikacji z otoczeniem w pojeździe autonomicznym | 199 |
| Zbigniew ŻELAZNY, Projekt koncepcyjny lekkiego pojazdu elektrycznego | 209 |

WPROWADZENIE

Niniejsza monografia naukowa jest syntezą prac studentów zrzeszonych w kołach naukowych polskich uczelni technicznych oraz miłośników motoryzacji.

Różnorodność zagadnień dotyczących tematyki „Pojazdów przyszłości” pozwalają Autorom na bardzo dużą inwencję twórczą. Zaprezentowano wizje pojazdów jakie już w dalekiej i niedalekiej przyszłości mogą być powszechnie użytkowane. Przedstawiono innowacyjne rozwiązania techniczne ułatwiające współczesnemu kierowcy poruszanie się po drogach a zarazem które czynią jazdę bezpieczniejszą. Analiza ergonomii jazdy dająca większy komfort dla kierowcy i pasażera to jeden z przykładów spojrzenia na potrzeby użytkownika. Wykorzystanie inteligentnych systemów sterowania pojazdami, monitorowanie przejazdu, pomoc kierowcy poprzez zastosowanie automatyki sterowanej mikrokomputerami to już niezbędne elementy systemu komunikacji przy racjonalnej jeździe pojedynczego użytkownika jak i floty pojazdów.

Zwrócenie uwagi na aspekty ekologiczne związane z użytkowaniem pojazdów dają możliwość pokazania rozwiązań pojazdów, które minimalizują lub wręcz usuwają negatywne oddziaływanie ich na środowisko naturalne. Prace Autorów dotyczą konstrukcji pojazdów wykorzystujących nie tylko energię elektryczną jako źródło zasilania ale także skroplony azot i sprężone powietrze.

Innymi rozwiązaniami oszczędzania paliwa są minimalizacja masy pojazdu i jego elementów. Wykorzystanie Metody Elementów Skończonych MES dla sprawdzenia słuszności przyjętych rozwiązań redukujących masę pojazdu jest nowoczesnym i szybkim sposobem analizy konstrukcji przedstawionych jako model trójwymiarowy 3D.

Poprawę efektywności pojazdu można zrealizować poprzez zastosowanie układów odzysku energii jak i wykorzystanie ciepła odpadowego generowanego w pojeździe. Ta tendencja jest słuszna, gdyż w każdym pojeździe można odzyskać energię traconą na przykład podczas hamowania i ją wykorzystać podczas przyspieszania. Różnica temperatury silnika i otoczenia, może być wykorzystana do produkcji energii elektrycznej, której moc można wyznaczyć stosując równania termodynamiki (efekt Seebecka).

Celem monografii jest przedstawienie innowacji motoryzacyjnych w ramach szeroko rozumianego transportu a dotyczącego jego rozwoju w aspekcie zwiększonego zainteresowania Gospodarki Narodowej Polski.

Wrocław, kwiecień 2016 r.

Plk dr hab. inż. Mieczysław Struś, prof. PWr.

Kacper BACIK*
Dawid LUKOSEK*

ZERO EMISSION CAR. KONCEPCJA ELEKTRONIKI W SPORTOWYM SAMOCHODZIE ELEKTRYCZNYM. STEROWANIE ORAZ AKWIZYCJA DANYCH Z PODZESPOŁÓW

Referat krótko przedstawia koncepcję układu elektronicznego w sportowym samochodzie z napędem elektrycznym. Opisuje założenia projektowe postawione dla samochodu oraz dobór podzespołów, które pozwolą dane założenia spełnić. Przedstawione są główne podzespoły samochodu – silnik, bateria oraz falownik. Zaprezentowane są również najważniejsze elementy układu elektroniki, jak komputer sterujący, system transferu danych oraz środowisko programistyczne z opisem zalet, które determinują ich użycie w projekcie. Wnioski są podsumowaniem najistotniejszych informacji o układzie oraz przedstawiają zakładany dalszy kierunek prac.

1. WSTĘP

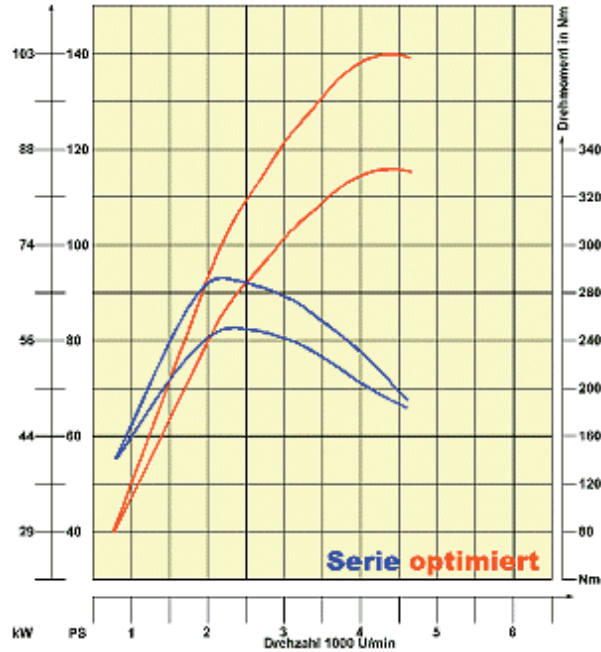
Projekt Zero Emission Car jest projektem sportowego samochodu elektrycznego przeznaczonego do jazdy w kontrolowanym poślizgu zwanym potocznie driftem. Bazą jest klasyczne BMW E36. Zostało ono wybrane ze względu na sprawdzoną konstrukcję, łatwy dostęp do części, a także dużą dostępność materiałów i literatury dotyczącej zastosowania tego modelu w sportach motorowych. Docelowo samochód ten ma mierzyć się w zawodach driftowych, wykorzystując przewagę, którą daje mu napęd elektryczny.

1.1. DLACZEGO NAPĘD ELEKTRYCZNY?

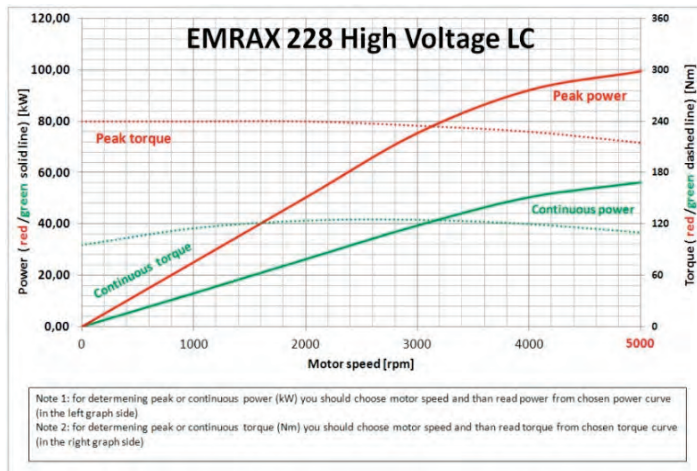
Rozwiązanie jest proste. Aby wejść w poślizg potrzebny jest bardzo duży moment obrotowy na kołach w jak najszerszym zakresie obrotów silnika. W klasycznych rozwiązaniach spalinowych konieczne jest utrzymywanie wysokich obrotów silnika i użytkowanie dużego przełożenia na skrzyni biegów. Problem stwarza również nieliniowa

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej wału silnika. W silnikach elektrycznych moment obrotowy jest stały niezależnie od prędkości obrotowej wału. Umożliwia to wejście w poślizg już przy małych prędkościach obrotowych, a ze względu na liniowy przyrost mocy zapewnia bardziej precyzyjną kontrolę poślizgu. Na rysunkach 1 i 2 widać, że moment obrotowy w silniku elektrycznym jest niemal stały, podczas gdy w silniku spalinowym zmienia swoją wartość ponad dwukrotnie.



Rys. 1. Zależność momentu obrotowego i mocy od prędkości obrotowej silnika elektrycznego



Rys. 2. Zależność momentu obrotowego i mocy od prędkości obrotowej silnika spalinowego

1.2. PROBLEMY ZWIĄZANE Z ZASTOSOWANIEM NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO PRZY TWORZENIU ZAŁOŻEŃ DOTYCZĄCYCH STEROWANIA

Odkąd w samochodach spalinowych zrezygnowano z zasilania gaźnikowego, potrzebny jest komputer sterujący pracą silnika, który realizuje tę samą funkcję. W samochodach z napędem elektrycznym trzeba zmierzyć się z zupełnie innymi problemami. Jednym z dodatkowych utrudnień jest fakt, że w klasycznym rozwiązaniu nie ma potrzeby stosowania elektroniki do zarządzania zużyciem paliwa, a w samochodach elektrycznych pobieranie energii z baterii musi być ściśle kontrolowane, gdyż nawet minimalne różnice potencjałów na celach baterii litowo-jonowych stwarza duże zagrożenie. Za kontrolowanie tych parametrów odpowiedzialny jest system BMS (*Battery Management System*). Na wyjściu z baterii uzyskuje się prąd stały, jednak, ze względu na niższą efektywność silników prądu stałego, w przemyśle motoryzacyjnym stosuje się silniki prądu zmiennego. Do zamiany prądu stałego na prąd zmienny służy falownik, który nadaje mu odpowiednie parametry.

1.3. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

- Minimalna moc silnika wystarczająca do wprowadzenia samochodu w poślizg;
- Minimum pół godziny jazdy w trybie sport;
- System sterujący zapewniający minimalne opóźnienia;
- Niska waga komponentów ze względu na użycie w sporcie;
- Integracja systemu z zewnętrznym komputerem;
- Pomiar efektywności poślizgu.

2. DOBRANE PODZESPOŁY

2.1. SILNIK

Biorąc pod uwagę założenia projektowe, jako pierwszy dobrany został odpowiedni silnik elektryczny. Po analizach możliwości zastosowania wybrano silnik EMRAX 228



Rys. 3. Silnik EMRAX 228

– bezszczotkowy, synchroniczny, trójfazowy silnik elektryczny – przedstawiony na rysunku 3. Jego główne zalety to bardzo dobry stosunek mocy do masy – przy wadze zaledwie 13 kg charakteryzuje się mocą maksymalną na poziomie 100 kW. Dodatkową zaletą jest jego sprawność, co przekłada się na żywotność baterii oraz minimalizuje problem chłodzenia jednostki napędowej.

2.2. BATERIA

Aby wykorzystać potencjał tkwiący w silniku, do zasilenia zespołu napędowego, użyty zostanie pakiet ogniw litowo-jonowych o następujących parametrach przedstawionych w tabeli.

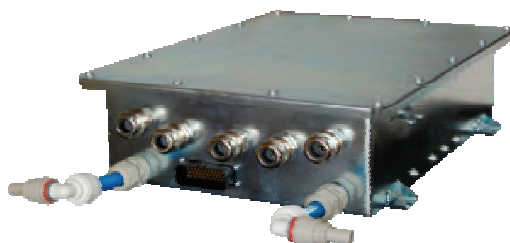
Tabela 1. Parametry elementów składowych baterii

| Product Specifications: | | | |
|-------------------------|----------|---------------------|----------------------------|
| Cell Configuration | 12S-2P | Max Cont. Discharge | 70 A |
| Modules per System | N/A | Max Pulse Discharge | 105 A (10 seconds) |
| Cells per Module | 24 | Max Cont. Charge | 70 A |
| Total Cell Quantity | 24 | Max Regen. Current | 70 A (10 seconds) |
| Max Voltage | 49.2 V | Dimensions | 199x178x271mm Hgt OT 282mm |
| Min Voltage | 30 V | Mass | 13.5 kg |
| Rated Capacity | 35 Ah | Heating/Cooling | Integrated Heatsink |
| Rated Energy | 1.51 kWh | | |

Ogniwa litowo-jonowe zostały wybrane ze względu na wysoką gęstość energii – około 0,54 MJ/kg czyli dwa razy więcej niż akumulator NiMH i sześć razy więcej niż akumulator kwasowo-ołowiowy. Akumulatory Li-Ion charakteryzuje też stosunkowo krótki czas ładowania – 15–30 min od 0 do 80%. Ponadto, w ogniwach tego typu nie występuje “efekt pamięci”.

2.3. FALOWNIK

Dla odpowiedniego wysterowania silnika konieczny jest inwerter zapewniający zadany moment obrotowy w silniku, poprzez odpowiednią modulację dostarczanego prądu.



Rys. 4. Falownik TWERD

Zadanie to zostanie powierzone falownikowi Twerd FNS-60 – przedstawiony na rysunku 4. Falownikowy Napęd Samochodowy dedykowany jest do zastosowania w napędach pojazdów elektrycznych. Jak wynika z poniższej tabeli 2, falownik ten sterowany jest poprzez szeroko stosowany standard CANopen.

Tabela 2. Parametry falownika Twerd FNS-60

| Cechy charakterystyczne | |
|-------------------------|---|
| Moc znamionowa | 60kW |
| Napięcie | 300 V...400 V DC |
| Kluczowanie | 5 kHz...10 kHz |
| Modulator | SVPWM |
| Zadawanie momentu | CANopen |
| Tryb pracy | FOC do silników SPMSM i IPMSM (sterowanie momentem, prędkością) |
| Zabezpieczenia | nadprądowe, zwarciove, termiczne układu, kontrola komunikacji CANopen |

3. KONCEPCJA ELEKTRONIKI

3.1. CZUJNIKI

Rozpatrując założenia projektu, do prawidłowego działania konieczne jest zastosowanie poniższych czujników

- Pedalbox – zawiera dwa pedały – gazu, którego położenie jest przekazywane przez potencjometr oraz hamulca sterującego hydraulicznym układem hamowania;
- Monostabilny przycisk przy hamulcu ręcznym hydraulicznym – 0–1 hamulcu ręcznym, w momencie zaciągnięcia falownik odcina podawanie prądu na silnik;
- Czujniki systemu BMS – mają krytyczne znaczenie dla bezpieczeństwa, pomiar napięcia na poszczególnych celach pakietu litowo-bhjonowego, temperatura baterii;
- Czujniki na falowniku – pomiar prądu przekazywanego na silnik, położenie wału silnika, kąt międzyfazowy, prędkość obrotowa wału, moment obrotowy na wale, temperatura falownika;
- Czujniki na silniku – temperatura silnika;
- Czujnik aktualnego biegu – aktualny bieg;
- Przyciski bezpieczeństwa – wewnętrzny oraz zewnętrzny – odcinające zasilanie;
- Dwa akcelerometry – pomiar parametrów poślizgu – w uproszczeniu można stwierdzić, że im większe i szybsze są zmiany przyspieszeń, tym częściej kierowca dokonuje poprawek toru jazdy co wskazuje na konieczność popracowania nad techniką jazdy lub znalezienia innego źródła problemu.

3.2. URZĄDZENIA WYJŚCIOWE

Komputer zbierający informacje z powyższych czujników będzie obsługiwał następujące urządzenia:

- Falownik – sygnał z pedalboxa przetworzony w komputerze steruje silnikiem;
- Układy chłodzenia – ciecżą, do chłodzenia falownika i baterii oraz powietrzem, do chłodzenia silnika;
- Interface użytkownika – wyświetlacz LCD w miejscu liczników posiadający różne opcje wyświetlania;
- Układy hamulcowe;
- Komputer poza samochodem – akwizycja danych w czasie rzeczywistym, kontrola parametrów jazdy, awaryjne wyłączenie zdalne;
- Systemy bezpieczeństwa samochodu – elektryczne pasy bezpieczeństwa.

3.3. KOMPUTER STERUJĄCY

Jako główną jednostkę sterującą zajmującą się odbieraniem i przetwarzaniem sygnałów, sterowaniem falownikiem i łącznością z zewnętrznym komputerem potrzebny był układ spełniający kryteria:

- Odpowiednia moc obliczeniowa potrzebna by zachować odpowiednią responsywność całego układu, a szczególnie krytycznych podsystemów takich jak układ hamulcowy czy sterownie silnikiem;
- Niski pobór energii;
- Dostępność odpowiednich narzędzi programistycznych;
- Prosta integracja z pozostałymi układami;
- Umożliwienie stworzenia systemu czasu rzeczywistego- przydatność obliczeń zależna od czasu.

Jako układ spełniający te założenia wybrany został myRIO firmy National Instruments. Spełnia on przyjęte kryteria, ponadto jako układ kierowany do studentów zapewnia dużą ilość materiałów szkoleniowych i przykładowych projektów, co ułatwia szybkie wdrożenie tego rozwiązania. Układ ten umożliwia programowanie w środowisku LabVIEW – graficznym środowisku programistycznym stworzonym przez National Instruments. Używany w nim graficzny język programowania nosi nazwę “G”.

4. ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE

Kolejnym ważnym aspektem tworzenia elektroniki pojazdu ZEC jest oprogramowanie komputera sterującego. Mnogość zadań, jakie ma on wykonywać, komplikuje napisanie go w jednym z klasycznych języków. Przy wykorzystaniu platformy

myRio, prawie oczywistym wyborem jest zastosowanie języka do którego jest dedykowana, czyli graficznego języka "G" i obsługującego go środowiska LabVIEW (akronim nazwy ang. *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Język "G" składa się z blozków o różnych funkcjach połączonych ze sobą przewodami, które środowisko po skompilowaniu przekształca na kod maszynowy. Działa on na zasadzie dataflow. Oznacza to, że nie wykonuje po kolei linijek kodu (gdyż ich w ogóle nie ma) tylko w momencie gdy do blozka trafią informacje z przewodów wejściowych, wysyła sygnał dalej. Jest to niezmiernie istotna kwestia przy sterowaniu, ponieważ program nigdy nie jest w stanie wykonać operacji nie mając wszystkich danych. Jest to również gwarant tego, że wszystkie operacje zostaną wykonane w odpowiedniej kolejności. Dodatkowym atutem zastosowania języka graficznego jest jego przejrzystość i łatwość w detekcji błędów i usterek. Ciekawą funkcją dla projektu ZEC jest programowanie równoległe. Polega ono na równoczesnym pisaniu kodu i tworzeniu do niego GUI. Fakt ten będzie wykorzystany przy tworzeniu nowych liczników w postaci ekranu LCD oraz komputera do akwizycji danych poza samochodem. Wybranie sprawdzonego rozwiązania do przesyłu danych w postaci magistrali CAN zapewnia niezawodność oraz odpowiednią prędkość komunikacji między podzespołami. Skorzystanie z tego gotowego rozwiązania uprości, a przede wszystkim da gwarancję prawidłowego działania magistrali. Kolejną możliwością LabVIEW przy współpracy z myRio jest akwizycja danych i przesyłanie ich w czasie rzeczywistym do komputera znajdującego się poza samochodem co pozwala na ciągle monitorowanie stanu pojazdu, parametrów ślizgu, oraz co najważniejsze, zdalnego wyłączenia podzespołów, przez zespół wspomagający.

5. WNIOSKI ORAZ KIERUNEK DALSZYCH PRAC

Układ elektroniki jest jednym z najważniejszych układów w samochodzie elektrycznym, gdyż bez niego nie jest on w stanie samodzielnie się poruszać. Przedstawiona powyżej koncepcja układu elektroniki najpełniej odpowiada na potrzeby stawiane przez założenia projektowe. Wybrany kontroler spełnia wymagane funkcje, takie jak akwizycja danych oraz sterowanie podzespołami. Posiada również wystarczającą moc obliczeniową aby samodzielnie obsłużyć wszystkie funkcje i zapewnić przy tym bardzo małe opóźnienia. Wybranie sprawdzonego rozwiązania do przesyłu danych w postaci magistrali CAN zapewnia niezawodność oraz odpowiednią prędkość komunikacji między poszczególnymi podzespołami. Zastosowanie do oprogramowania środowiska LabVIEW gwarantuje, dzięki zastosowaniu systemu dataflow, prawidłową kolejność działania podzespołów oraz możliwość integracji samochodu z komputerem zewnętrznym w czasie rzeczywistym.

Dalsze prace będą miały charakter praktyczny i polegać będą na montażu podzespołów oraz przewodów we wnętrzu pojazdu i programowaniu komputera, a także pomiarach sprawdzających poprawność działania czujników.

LITERATURA

- [1] <http://www.enstroj.si> – otwarto 10.04.2015.
- [2] IWANICKI A., *Interfejsy CAN i LIN – zastosowania*, Elektronika Praktyczna, 2005, nr 3, nr 4.
- [3] RICHMOND R., *Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*.
- [4] PRZEPIÓRKOWSKI J., *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*.

*rower, napęd pneumatyczny,
napęd elektryczny*

Kajetan BARCZAK*
Daniel BRANDYK*

KONCEPCJA LEKKIEGO POJAZDU MIEJSKIEGO DLA OSOBY NIEPEŁNOSPRAWNEJ I OPIEKUNA

W artykule przedstawiono koncepcję dwuosobowego, trójkołowego wózka rowerowego przeznaczonego do transportu i rehabilitacji osób niepełnosprawnych. Pojazd jest projektowany jako środek transportu miejskiego przeznaczony do użytkowania na ścieżkach rowerowych. Planowana masa użytkowa pojazdu wynosi 300 kg, a maksymalna dopuszczalna przepisami prędkość wynosi 25 km/h. Przy opracowywaniu koncepcji pojazdu uwzględniono uwagi zebrane w trakcie konsultacji ze środowiskiem osób niepełnosprawnych związane z usytuowaniem foteli oraz dostosowaniem przekładni rowerowej do potrzeb użytkowników. Wózek oprócz klasycznego napędu rowerowego wyposażony będzie w zero emisyjny napęd hybrydowy w układzie pneumatyczno elektrycznym. Część pneumatyczna napędu hybrydowego zostanie zbudowana z układu trzech siłowników napędzających wał korbowy. Jako część elektryczna zostanie wykorzystany bezszczotkowy silnik elektryczny wbudowany w przednie koło.

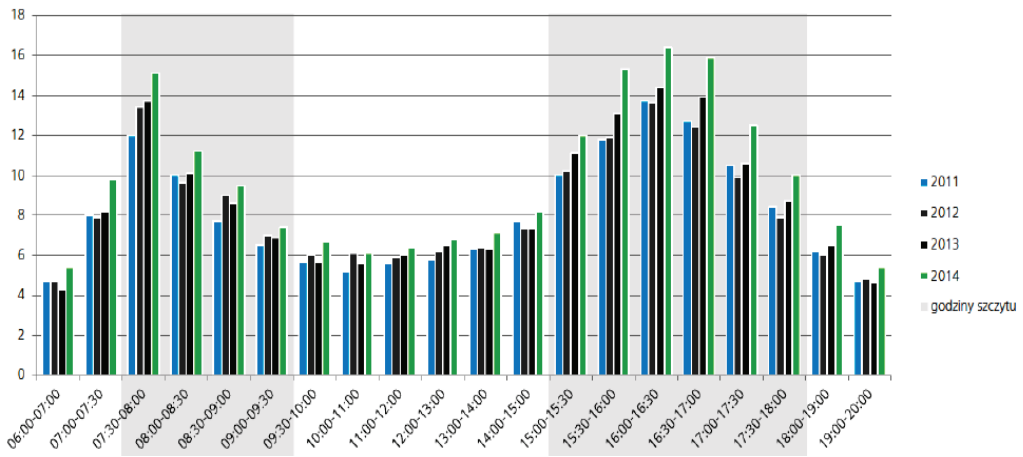
1. WSTĘP

Genezą rozpoczęcia projektu lekkiego pojazdu miejskiego były zainteresowaniai doświadczenia związane z zagadnieniami konstruowania pojazdów przyjaznych dla otoczenia, a także kontakt ze środowiskiem osób niepełnosprawnych. W efekcie powstała koncepcja zaprojektowania prototypu nowego typu środka transportu miejskiego. Wstępny projekt wózka rowerowego prezentowany w niniejszym artykule zostanie poddany konsultacjom społecznym w ramach współpracy z przedstawicielami Dolnośląskiego Sejmiku Osób Niepełnosprawnych. Po uwzględnieniu uwag docelowej grupy użytkowników i naniesieniu wymaganych zmian powstanie ostateczna wersja projektu. Prototyp pojazdu zostanie zbudowany przez członków Koła Naukowego Skrzyneczka działającego przy Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Koło Naukowe Skrzyneczka, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Infrastruktura drogowa dużych miast Polski cechuje się istnieniem tzw. wąskich gardeł, które nadal są nierozwiązywalnym problemem. Analizy wyraźnie pokazują, że pomimo prób rozwiązywania zaistniałej sytuacji i dużych nakładów finansowych czas przejazdu przez ulice głównych miast wydłuża się, a straty ekonomiczne generowane w wyniku korków drogowych nadal rosną. We Wrocławiu opóźnienia miesięczne w szczytach komunikacyjnych na przestrzeni ostatnich czterech lat zwiększyły się o dziewięćdziesiąt minut.



Rys. 1. Wzrost czasu opóźnień we Wrocławiu [4]

We Wrocławiu podjęto próbę naprawy obecnej sytuacji drogowej. Uchwałą Zarządu Województwa Dolnośląskiego nr 5088/TV/13 przyjęto politykę równoważenia systemu transportowego – podsystem rowerowy, na podstawie której została opracowana Dolnośląska Polityka Rowerowa. Zgodnie z przyjętą strategią rozwoju województwa na lata 2014–2020 na rozbudowę ścieżek rowerowych i wdrażanie niskoemisyjnych strategii transportowych zaplanowano wydatki w wysokości 33 mln euro [5]. Zeroemisyjny wózek rowerowy wpisuje się doskonale w priorytety realizowanego przez władze województwa programu mającego na celu naprawę sytuacji komunikacyjnej Dolnośląskiej stolicy. Ponadto projektowany pojazd ma ułatwić normalne funkcjonowanie w przestrzeni miejskiej osobom niepełnosprawnym. Zgodnie z przyjętymi założeniami musi spełniać wymagania umożliwiające użytkowanie go na ścieżkach rowerowych. W myśl obowiązujących przepisów ze ścieżek rowerowych mogą korzystać użytkownicy rowerów i wózków rowerowych. Zgodnie z Prawem o Ruchu Drogowym opublikowanym w Dzienniku Ustaw z 2005 r. nr 108, poz. 908 z późniejszymi zmianami; stan aktualny czerwiec 2012 po ścieżkach rowerowych wolno poruszać się rowerami i wózkami rowerowymi.

Przy czym za wózek rowerowy uważany jest pojazd o szerokości powyżej 0,9 m przeznaczony do przewozu osób lub rzeczy poruszany siłą mięśni osoby jadącej tym pojazdem; wózek rowerowy może być wyposażony w uruchamiany naciskiem na pedały pomocniczy napęd elektryczny zasilany prądem o napięciu nie wyższym niż 48 V o znamionowej mocy ciągłej nie większej niż 250 W, którego moc wyjściowa zmniejsza się stopniowo i spada do zera po przekroczeniu prędkości 25 km/h [2]. Jednocześnie mając na uwadze ograniczenia wynikające z Zarządzenia Prezydenta Wrocławia z dnia 9 czerwca 2005 r. „Standardy projektowe i wykonawcze dla systemu rowerowego miasta Wrocławia”, w myśl którego w celu zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom i uniemożliwieniu wjazdu samochodów na ścieżki rowerowe drogi te mają być oddzielane przez słupki o rozstawie 1,5 m [6]. W związku z powyższym szerokość pojazdu nie może przekraczać 1500 mm. Zgodnie z raportem z badań dotyczących zatorów drogowych w przeprowadzonych przez Deloitte i Targeo.pl Wrocław jest obecnie najbardziej zakorkowanym z polskich miast [4]. Średnia prędkość jazdy samochodem w okolicach centrum waha się od 18 do 40 km/h z tego powodu jednym z założeń projektowych jest możliwość poruszania się po ścieżkach rowerowych, co w godzinach szczytów komunikacyjnych skraca czas przejazdu w porównaniu do przejazdu przez miasto samochodem.

Docelową grupą użytkowników projektowanego wózka rowerowego są osoby niepełnosprawne, dla których pojazd ma pełnić oprócz funkcji transportowej rolę środka rehabilitacji. Należy jednak podkreślić, że docelową grupą użytkowników są osoby o różnym stopniu i charakterze niepełnosprawności, dlatego musi istnieć możliwość szybkiego zaadaptowania pojazdu dla potrzeb konkretnego użytkownika.

Po wstępnych konsultacjach przeprowadzonych z niewielką grupą docelowych użytkowników przyjęto następujące założenia:

- dla osób z porażeniem kończyn dolnych, a sprawnymi kończynami górnymi wskazana jest możliwość przestawienia pedałów do pozycji umożliwiającej napędzanie przekładni rowerowej rękoma;
- dla osób z niedowładem nóg powinna istnieć możliwość stabilnego wpięcia stóp w pedały co umożliwi czynne uczestniczenie w napędzaniu pojazdu i jednocześnie rehabilitację poprzez ruch;
- w przypadku osoby niewidomej pojazd musi cechować się pozbawionym przeszkód dostępem do siedziska i możliwością wpięcia stóp w pedały.

Reasumując, za wskazane wymagania użytkowe przyjęto następujące założenia:

- pojazd musi być bardzo stabilny;
- siedzisko wyposażone w pasy bezpieczeństwa z możliwie łatwym dostępem;
- pedały z możliwością wpięcia stóp;
- przekładnia z możliwością adaptacji do napędu ręcznego;
- możliwość dowolnego sprzęgania i blokowania w pozycji stałej przekładni rowerowej.

Na podstawie powyższych założeń stwierdzono, że wózek rowerowy musi mieć siedziska ustawione obok siebie, a koła pojazdu powinny być nachylone po ok. 15 stopni,

co oprócz zwiększenia stabilności pojazdu ułatwia dostęp do foteli i umożliwia osobie niepełnosprawnej swobodne wsiadanie. Należy jednak podkreślić, że konieczne są konsultacje z większą grupą osób o różnym stopniu i charakterze niepełnosprawności. Po przyjęciu powyższych założeń wykonany został projekt trójkołowego pojazdu o szerokości 1230 mm i długości 1760 mm z dwoma pochylonymi kołami tylnymi i centralnie umiejscowionym kołem przednim. Kierownica umiejscowiona po lewej stronie. Przednie koło zamocowano na jednostronnym widelcu. Takie rozwiązanie pozwala na redukcję masy własnej pojazdu i ułatwia rozwiązanie kierowania. Pojazd wyposażono w dwa ustawione obok siebie fotele o szerokości 450 mm z regulowanym kątem ustawienia oparcia i pasami bezpieczeństwa. Ze względu na oszczędność miejsca odstęp między fotelami wynosi 40 mm. Dostęp do fotela pasażera jest pozbawiony jakichkolwiek przeszkód i ograniczeń. Przekładnie rowerowe umiejscowione przy obu fotelach sprzęgnięte są za pomocą łańcucha z wałem centralnym. Moc z wału centralnego jest przekazywana za pomocą przekładni łańcuchowej na wał tylny a z niego na tylne koła pojazdu. Pojazd zostanie wyposażony w hybrydowy pneumatyczno-elektryczny układ napędowy. Przestrzeń pod fotelami umożliwia zamontowanie wszystkich jego elementów.

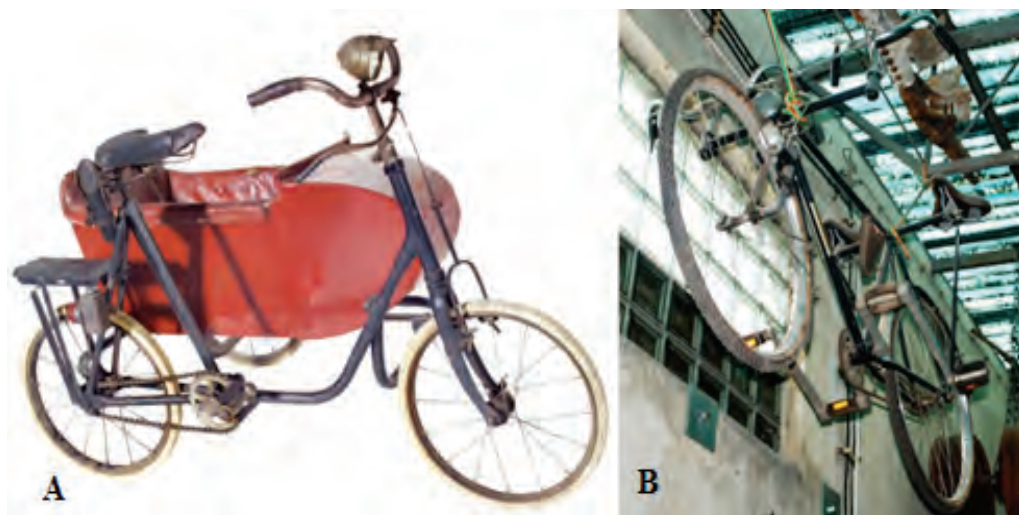


Rys. 2. Średnia prędkość w zależności od odległości od centrum miasta [3]

Model prototypu wózka rowerowego zostanie przedstawiony w formie prezentacji Dolnośląskiemu Sejmikowi Osób Niepełnosprawnych, a po naniesieniu ewentualnych poprawek wykonany i przekazany do jazd testowych.

Jedną z inspiracji dla budowy pojazdu jest konstrukcja dwuosobowego roweru produkowanego na początku XIX wieku w Anglii, w którym w odróżnieniu od popularnych w latach 80. XX wieku tandemów, gdzie pasażer siedział za plecami kierowcy, siedziska są umiejscowione równolegle.

Taki pojazd jest bardzo stabilny spełnia więc podstawowe założenia dotyczące bezpieczeństwa i odczuwanego komfortu jazdy, co jest bardzo istotną cechą dla docelowej grupy użytkowników.



Rys. 3. Historyczne rozwiązania dwuosobowych rowerów z siedzeniami równoległymi [1]

Hybrydowy układ napędowy będzie zbudowany z silnika pneumatycznego oraz silnika elektrycznego. Silnik pneumatyczny zostanie zbudowany z trzech siłowników o średnicy tłoka 50 mm i skoku 200 mm sprzężonych z wałem korbowym. Ciśnienie pracy silnika pneumatycznego wynosi 0,6 MPa. Silnik elektryczny o mocy 250 W zasilany z akumulatorów jest przewidziany jako napęd pomocniczy i będzie pełnił również funkcję prądnicy odzyskując energię przy hamowaniu, zwalnianiu czy też zjazdach w dół. Taka metoda odzyskiwania energii jest powszechnie stosowana we wszystkich współczesnych rozwiązaniach napędów hybrydowych i w znaczący sposób zwiększa sprawność energetyczną układu. Należy jednak podkreślić, że akumulatory mają ściśle określoną pojemność i nie można dopuścić do próby ich nadmiernego naładowania. W związku z powyższym przy opracowywaniu założeń konstrukcyjnych należy przyjąć możliwość zaistnienia sytuacji w której akumulatory są całkowicie naładowane i równocześnie istnieje potrzeba odbioru nadmiaru energii. Dla takiej sytuacji można przyjąć dwa rozwiązania – wysprzęglenie prądnicy lub dalszą możliwość odzyskiwania energii. Pierwsze rozwiązanie jest w związku z przyjętą zasadą optymalizacji efektywności energetycznej pojazdu niedopuszczalne.

Dlatego przyjęto rozwiązanie umożliwiające ciągły odzysk energii. Właśnie w tym celu przyjęto dwustopniowe dostarczanie sprężonego powietrza do siłownika napędu pneumatycznego. Silnik pneumatyczny będzie zasilany z układu dwóch zbiorników. Jako zbiornik główny przewidziano kompozytowy zbiornik o ciśnieniu nominalnym 20 MPa i pojemności 22 m³. Zbiornik pośredni o nominalnym ciśnieniu roboczym 0,8 MPa i pojemności 0,1 m³ umożliwi zainstalowanie sprężarki doładowującej go. Taki układ umożliwi redukcję poboru medium roboczego z głównego zbiornika, zabezpieczy napęd przed nadmiernym naładowaniem akumulatorów i zwiększy efektywność energetyczną napędu hybrydowego w układzie pneumatyczno-elektrycznym. Oba zbiorniki zostaną podłączone od spodu ramy pojazdu. Silnik pneumatyczny zostanie zamontowany za fotelami natomiast silnik elektryczny będzie wbudowany w przednie koło. Szacowana masa własna pojazdu wynosi ok. 100 kg.

Tabela 1. Masa własna pojazdu

| Lp. | Nazwa części | Masa kg |
|---------|--|---------|
| 1 | Aluminiowa rama nośna | 12 |
| 2 | Kompozytowy zbiornik wysokociśnieniowy | 30 |
| 3 | Stalowy zbiornik pośredni | 12,7 |
| 4 | Siłowniki | 2,4 |
| 5 | Wał korbowy | 2,5 |
| 6 | Przednie koło z silnikiem elektrycznym | 8 |
| 7 | Układ sterowania | 2,1 |
| 8 | Akumulator | 4,2 |
| 9 | Sprężarka | 2,3 |
| 10 | Tylne koła | 2,5 |
| 11 | Fotele | 8 |
| 12 | Inne (łańcuchy, przekładnia rowerowa, pedały, łożyskowanie itp.) | 5 |
| Łącznie | | 91,7 |

Poza wymienionymi komponentami na masę własną projektowanego wózka rowerowego składać się będą nieujęte w powyższej tabeli dodatkowe elementy takie jak podnóżki, pasy bezpieczeństwa, zagłówek dla osoby niepełnosprawnej itp. Projekt spełnia więc przyjęte wymagania dotyczące masy użytkowej oszacowanej wstępnie na 300 kg.

Stworzenie ostatecznej wersji projektu będzie możliwe po konsultacjach z większą grupą osób niepełnosprawnych. Projekt koncepcyjny pojazdu wykonano w programie Autodesk Inventor. W trakcie jego tworzenia uwzględniono wymagania stawiane dla pojazdu rehabilitacyjnego, wymagania związane z możliwością użytkowania pojazdu na ścieżkach rowerowych oraz gabaryty umożliwiające zainstalowanie hybrydowego układu napędowego.



Rys. 4. Projekt koncepcyjny pojazdu model 3D widok od przodu [1]

Koncepcja dwuosobowego trójkołowego wózka rowerowego z napędem hybrydowym zostanie przedstawiona na spotkaniu w Dolnośląskim Sejmiku Osób Niepełnosprawnych. Po konsultacjach i uwzględnieniu wymagań ergonomicznych docelowej grupy użytkowników na bazie prezentowanej koncepcji zostanie wykonany model i dokumentacja rysunkowa prototypu. Pojazd w wersji prototypowej zostanie wykonany w ramach prac Koła Naukowego Skrzyńeczka, a po jazdach testowych dojazd próbnych zostanie zaproszona reprezentatywna grupa docelowych użytkowników. Na bazie zebranych doświadczeń zostanie opracowana ostateczna projekt. Mając na uwadze potrzeby środowiska osób niepełnosprawnych oraz problematykę transportu miejskiego w dużych miastach istnieje realna szansa stworzenia finalnego produktu gotowego do seryjnej produkcji.

LITERATURA

- [1] BRANDYK D., *Projekt układu napędowego hybrydowego. Układ pneumatyczno – elektryczny*, niepublikowana praca magisterska, Wrocław 2015.
- [2] Dziennik Ustaw z 2005 r. Nr 108, poz. 908, z późn. zm., stan aktualny na czerwiec 2012 r.
- [3] e-gospodarka, <http://www.egospodarka.pl/art/galeria/74844,Srednia-predkosc-w-zalezności-od-odleglosci-od-centrum-Wroclaw,16,39,1.html>
- [4] Forbes, <http://auto.forbes.pl/7-najbardziej-zakorkowanych-miast-w-polsce,artykuly,191281,1,1.html>
- [5] *Polityka Rowerowa Wrocławia* Dyrektor Departamentu Rozwoju Regionalnego Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego, http://www.rowerowy.wroclaw.pl/imgturysta/files/IKRRR_Maciej_Zathey.pdf
- [6] *Standardy projektowe i wykonawcze dla systemu rowerowego miasta Wrocławia*, Załącznik nr 2 do Zarządzenia nr 5493/05 Prezydenta Wrocławia z dnia 9 czerwca 2005 r.

Marcin BIEGANOWSKI*
Piotr POLISZUK*

EKOLOGICZNE KONSTRUKCJE LEKKIE – ZARYS OGÓLNY

W artykule przedstawiono przykładowe rozwiązania konstrukcyjne współczesnych pojazdów, do budowy których wykorzystano nowoczesne materiały inżynierskie. Zaprezentowano wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym stosowanym w przemyśle motoryzacyjnym oraz strategię tworzenia konstrukcji lekkich. Omówiono sposoby wykorzystania osiągnięć bioniki do tworzenia materiałów konstrukcyjnych i trendy w materiałach konstrukcji lekkich. Przedstawiono stale i stopy stosowane w budowie pojazdów, wykorzystanie materiałów ceramicznych i tworzyw sztucznych oraz kompozytów. Zwrócono uwagę na energooszczędność stosowania nowoczesnych materiałów inżynierskich oraz możliwość ich recyklingu.

1. WSTĘP

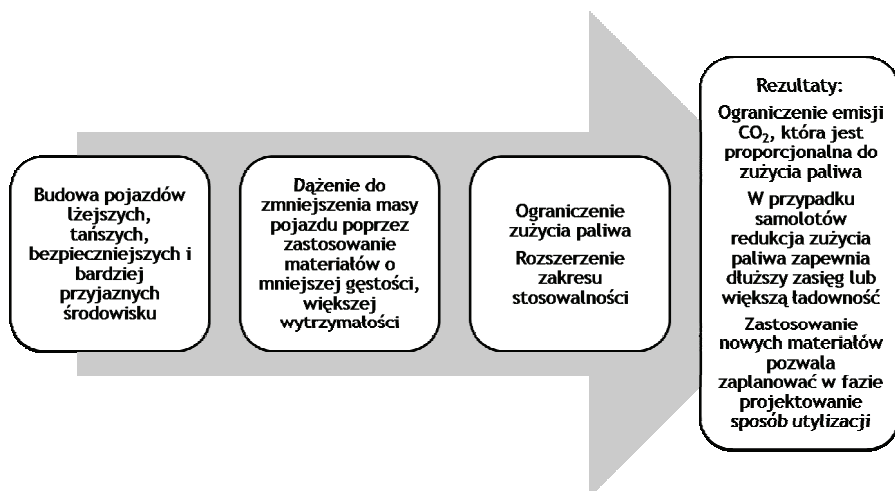
W obecnych czasach nieomal we wszystkich znaczących gałęziach przemysłu można zaobserwować wyraźny trend mający na celu redukcję masy produktu końcowego. Początkowo technologia tworzenia konstrukcji lekkich była rozwijana i wykorzystywana na szeroką skalę głównie w lotnictwie, ponieważ początkowo była ona bardzo droga. Jednak wraz z doskonaleniem nowych procesów technologicznych, opracowaniem i opanowaniem nowych materiałów lekkich, procedur konstrukcyjnych konstrukcje lekkie z powodzeniem mogły zostać zastosowane w wyrobach powszechnego użytku.

Zastosowanie konstrukcji lekkich w przemyśle lotniczym miało głównie na celu zmniejszenie zużycia paliwa oraz zwiększenie zasięgu bądź ładowności statków powietrznych. Podobnie jest w przypadku branży motoryzacyjnej, która stawia sobie za cel budowanie pojazdów lżejszych a przez to tańszych w eksploatacji oraz co ważniejsze bardziej ekologicznych co w świetle ciągle rosnących wymagań środowiskowych (EURO 6) stawianych nowym konstrukcjom jest niezwykle istotne.

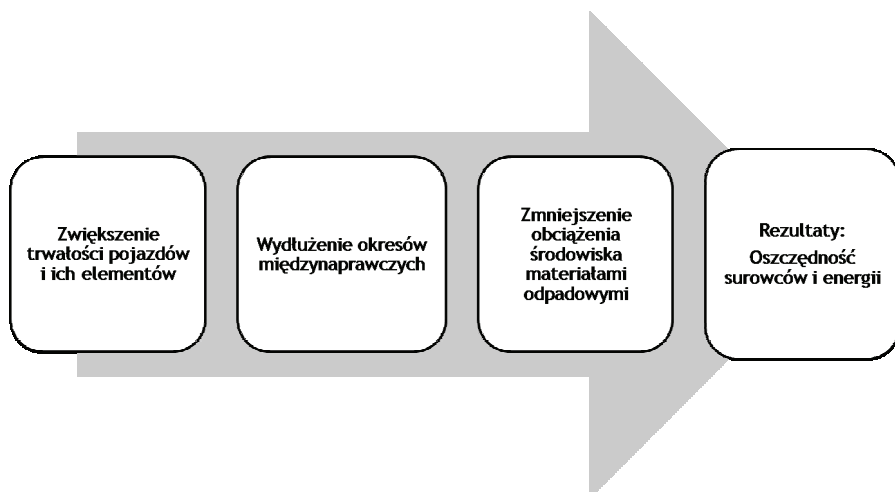
Zmniejszenie masy pojazdu przy zachowaniu tego samego poziomu bezpieczeństwa możliwe jest poprzez zastępowanie konwencjonalnych materiałów stosowanych dotych-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

czas w budowie pojazdów tzw. materiałami lekkimi, czyli materiałami o mniejszej gęstości, ale o wysokim stosunku wytrzymałości na rozciąganie do gęstości (tzw. wytrzymałość względna). Materiały lekkie możemy podzielić na dwie rodziny, materiały metalowe oraz materiały kompozytowe. Najlepszym przykładem materiału należącego do grupy metali lekkich są stopy aluminium, które są najczęściej wykorzystywanymi materiałami w konstrukcji samochodów. Granicą gęstości, poniżej której można zaliczyć materiał do grupy metali lekkich jest wartość gęstości tytanu która wynosi ok. $4,5 \text{ g/cm}^3$. Tak więc prócz stopów aluminium w obszarze zainteresowania konstruktorów są także stopy tytanu, magnezu, berylu oraz materiały kompozytowe, które w ostatnich latach coraz częściej konkurują z aluminium.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu wprowadzania konstrukcji lekkich



Rys. 2. Schemat blokowy procesu wprowadzania konstrukcji lekkich

Poszukiwania nowych materiałów i metod kształtowania konstrukcji wymusiły także rozwój technik wytwarzania, dlatego dzięki ciągle rosnącym udziałem konstrukcji lekkich w ogóle wyrobów produkowanych doszło do opracowania nowych metod oraz doskonalenia i dostosowania znanych technologii do specyfiki zastosowania konstrukcji. Z tego powodu można powiedzieć, że pojawienie się konstrukcji lekkich miało olbrzymi wpływ na rozwój technologii wytwarzania oraz łańcuchów procesowych.

Zastosowanie nowych materiałów pozwala także na dokładniejsze zaplanowanie cyklu życia produktu oraz przewidzenie sposobu utylizacji po zakończeniu przydatności do eksploatacji. Ogólny łańcuch przyczynowo-skutkowy pokazujący zalety wynikające z wprowadzenia konstrukcji lekkich pokazano na rys. 2.

2. WYMAGANIA STAWIANE MATERIAŁOM I KONSTRUKCJOM LEKKIM W PRZEMYŚLE MOTORYZACYJNYM

Materiały wykorzystywane do produkcji konstrukcji lekkich wykorzystywanych w motoryzacji powinny charakteryzować się możliwe najwyższym współczynnikiem wytrzymałości względnej, tak aby zmiana materiału nie miała ujemnego wpływu na sztywność i wytrzymałość, ponieważ bezpieczeństwo jest wypadkową doboru odpowiedniego materiału oraz właściwej dla niego wytrzymałości. Z tego powodu materiał powinien umożliwiać odpowiednie jego kształtowanie w trakcie procesu technologicznego. Ze względu na wymagania dotyczące ochrony środowiska sam proces powinien w jak najmniejszym stopniu ingerować w środowisko naturalne, a materiały powinny być możliwie jak najbardziej biodegradowalne oraz umożliwiać sprawny recykling pojazdów.

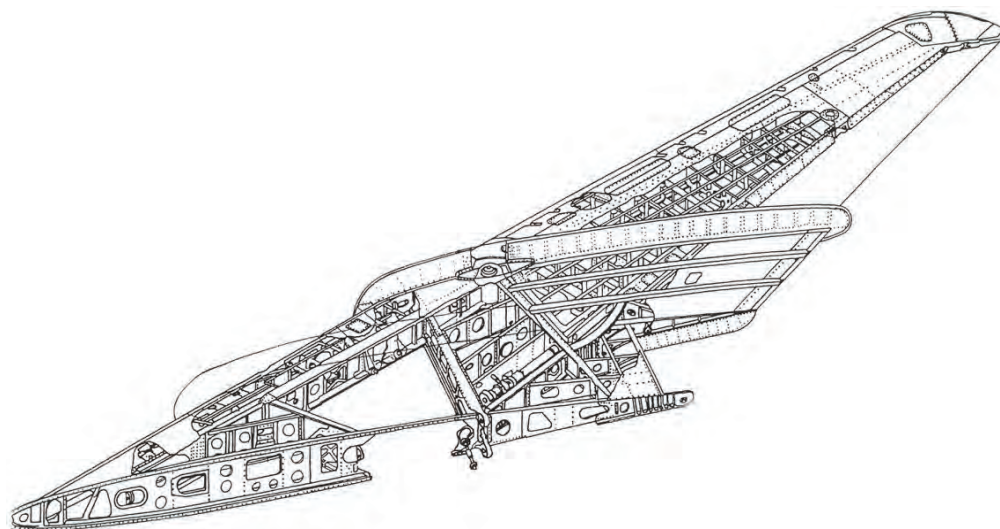
Natomiast optymalna konstrukcja lekka powinna zapewniać odpowiednie możliwości techniczne do wykorzystania materiałów o jak najmniejszej dostępnej gęstości przy zapewnieniu wyrobom odpowiedniej sztywności i wytrzymałości poprzez odpowiednie ukształtowanie konstrukcji nośnej, dzięki czemu zminimalizowanie masy jest możliwe bez negatywnego wpływu na nośność i inne funkcje użytkowe wyrobu. Dlatego przy projektowaniu uwzględnione muszą zostać dodatkowe reguły konstrukcyjne charakterystyczne dla lekkich konstrukcji.

Podstawową zasadą jest jak najbardziej bezpośrednie wprowadzanie sił, dzięki czemu możliwe jest uniknięcie złożonych stanów naprężeń. Uzyskany w przybliżeniu stały rozkład obciążenia pozwala wykorzystać specjalne właściwości materiałów, takie jak np. zwiększona wytrzymałość w odpowiednim kierunku w celu odpowiedniego ukształtowania konstrukcji. Natomiast w przypadku, gdy niemożliwe jest określenie stanu obciążenia oraz kierunku działania sił, tak jak jest to w przypadku skrzydła szybowca zastosowanie konstrukcji przekładkowej pozwoli zapewnić mniej więcej te same właściwości wytrzymałościowe elementu.



Rys. 3. Powody do stosowania konstrukcji lekkich

Kolejną cechą charakterystyczną jest osiągnięcie możliwie najwyższych geometrycznych momentów bezwładności powierzchni, tak aby zapewnić możliwie najwyższą sztywność. Z tego powodu konstrukcje lekkie często składają się z wielu elementów zwiększających sztywność lub w przypadku odlewów jednoczęściowych są gęsto uźebrowane. Jako przykład można podać konstrukcję kesonową skrzydła samolotu bojowego Su 22-M4.



Rys. 4. Przekrój skrzydła samolotu Su22-M4
(Źródło: <http://www.eskadra.net/samolot/skrzydlo-s-s.jpg>)

Jak można zauważyć analizując rys. 3, konstrukcja skrzydła w pełni spełnia wymagania stawiane konstrukcji lekkiej, silnie rozczłonkowana budowa zapewnia odpowiednią sztywność oraz umożliwia przenoszenie naprężeń zginających i skręcających powstających w czasie lotu (generowana siła nośna) oraz sił masowych od rozmieszczonych w skrzydle agregatów systemów płatowcowych, zbiorników paliwowych oraz sił przenoszonych przez podwozie główne w okresie startu i lądowania.

Konieczne jest także przeprowadzenie oceny okresu użytkowania oraz określenie trwałości wyrobu. W przypadku przemysłu motoryzacyjnego oraz lotnictwa jest to jeden z krytycznych aspektów projektowania, ponieważ określa bezpieczeństwo konstrukcji w okresie eksploatacji wyrobu oraz wpływa również bezpośrednio na koszty eksploatacyjne. W przypadku lotnictwa można wyróżnić dwa rodzaje resursu: godzinowy i kalendarzowy. Określa on po jakim czasie samolot nie będzie zdolny do dalszej eksploatacji bez szczegółowych badań technicznych. W przemyśle motoryzacyjnym funkcję resursu godzinowego pełni pośrednio przebieg samochodu, natomiast resurs kalendarzowy to nic innego jak okresowy przegląd techniczny.

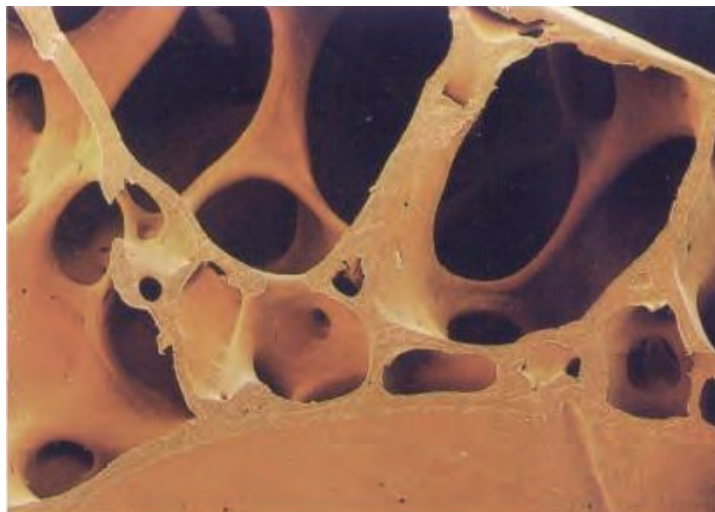
3. KONSTRUKCJE LEKKIE W PRZYRODZIE

Konstrukcje lekkie będące przedmiotem tego artykułu nie są dziełem człowieka, są one bardzo rozpowszechnione w przyrodzie. Dzieje się tak ponieważ ze względu na ograniczoną ilość zasobów w naturze wymagane jest jak najlepsze wykorzystanie energii i materiałów, tak aby zapewnić organizmom możliwości do realizowania podstawowych czynności życiowych w danych warunkach środowiskowych. Sztandarym przykładem konstrukcji lekkiej są kości pneumatyczne ptaków. Szkielet stanowi tylko 10% całkowitej masy ciała ptaka, w przekroju kości widać liczne puste przestrzenie z licznymi usztywnieniami (rys. 5).

Kość udowa człowieka jest również dobrym przykładem optymalnej konstrukcji lekkiej. Jest to największa i najbardziej obciążona kość w naszym układzie kostnym. W najbardziej obciążonej części, tj. głowie kości udowej przenoszącej obciążenia poprzez panewkę stawową na kość miedniczą. Dzięki gąbczastej strukturze tkanki kostnej dochodzi do redukcji miejscowych spiętrzeń naprężeń, natomiast trzon kości tworzy tkanka zbita chroniąca jamę szpikową. W procesie ewolucji doszło do swoistej optymalizacji kształtu, natura oszczędziła materiał w miejscach nie przenoszących obciążeń, z tego powodu w jamie szpikowej nie ma materiału kostnego.

Dziedziną nauki znajdującą się na pograniczu biologii i techniki która zajmuje się badaniem budowy i zasady działania organizmów żywych w celu wykorzystania uzyskanych wyników obserwacji w rozwiązaniach technicznych jest **bionika**. Do jednych z poddziedzin należy bionika strukturalna, która zajmuje się poszukiwaniem odpowiedzi na pytanie na jakich podstawowych regułach konstrukcyjnych bazują przenoszące

obciążenia struktury przyrody ożywionej i w jaki sposób można wykorzystać te reguły w konstrukcjach technicznych. Autorzy uważają, że wpływ bioniki na konstrukcje lekkie oraz na budowę mikromaszyn w najbliższych latach będzie coraz większy, jako przykład można podać budowę stawu biodrowo-krętarzowego owadów, który przypomina połączenie gwintu z nakrętką, jednak o rozmiarze około 50 mikrometrów który jest nieosiągalny przy dzisiejszych technikach wytwarzania.



Rys. 5. Przekrój przez kość pneumatyczną

4. STRATEGIE TWORZENIA KONSTRUKCJI LEKKICH

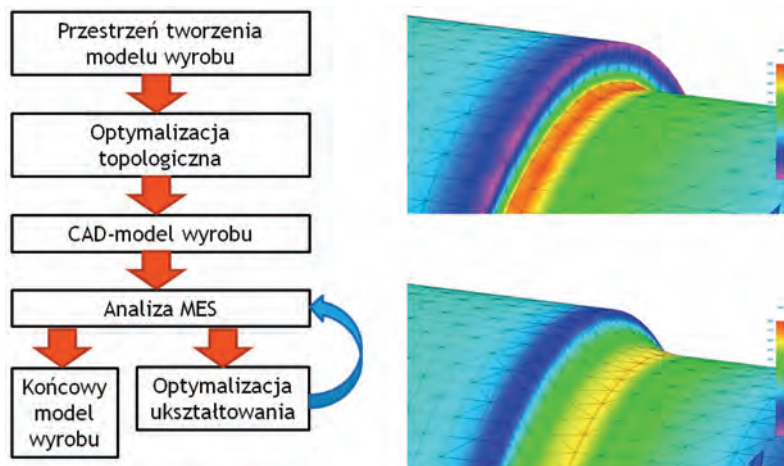
W literaturze można [1] znaleźć trzy podstawowe strategie tworzenia konstrukcji lekkich:

- materiałową,
- postaciową,
- wytwórczą.

Strategia materiałowa zakłada zastąpienie pierwotnego materiału przez materiał o mniejszej gęstości, ale o wyższej wytrzymałości względnej i lepszymi wskaźnikami użytkowymi. Jest to najstarsza strategia i zakłada ona zamianę konwencjonalnych materiałów stalowych na nowsze, bardziej wytrzymałe stale, wysokowytrzymałe stopy aluminium oraz materiały kompozytowe.

Kolejnym rodzajem strategii jest strategia postaciowa, która zakłada odpowiednie dostosowanie i optymalizację topologiczną rozmieszczenia materiału oraz jego ukształtowania w strukturze nośnej tak, aby odpowiadał rozkładowi obciążeń w trakcie pracy elementu. Dąży się do redukcji masy za pomocą zabiegów konstrukcyjnych przez umacnianie obszarów bardziej obciążonych, a pozabawianie materiału obszarów

mniej obciążonych poprzez redukcję np. grubości ścianek przy zachowaniu wymaganej sztywności. Ważne również jest odpowiednie ukształtowanie wyrobu, tak aby wyeliminować miejsca możliwych spiężeń naprężeń (rys. 6).



Rys. 6. Proces optymalizacji konstrukcji lekkiej występujący w strategii postaciowej

Ostatnią strategią jest strategia wytwórcza, która zakłada maksymalne wykorzystanie możliwości technologicznych w celu minimalizacji ilości i miejsc połączeń pomiędzy elementami przy jednoczesnej maksymalizacji funkcjonalności przedmiotu, dąży ona do jednoczesności, dzięki czemu możliwe jest minimalizowanie zużycia materiału oraz kosztów procesu części współpracujących.

5. RODZAJE KONSTRUKCJI LEKKICH

Wszystkie wymienione w poprzednim punkcie strategie mają na celu redukcję masy produktu, często jednak w celu jak największej możliwej redukcji masy należy zastosować wszystkie strategie razem. W procesie projektowania trzeba także wziąć pod uwagę konsekwencje zwiększania stopnia lekkości konstrukcji, ponieważ wraz z jego zwiększaniem rosną koszty inżynierskie, które są związane z bezpośrednio z procesem projektowania. Najczęściej wraz ze zwiększaniem stopnia lekkości konstrukcji rosną także koszty materiałowe oraz związane z nimi koszty wytwarzania spowodowane koniecznością stosowania nietypowego procesu technologicznego oraz wymaganych przez niego nietypowych narzędzi. Z tego powodu projektant często staje przed problemem wyboru optymalnego zakresu konstrukcji lekkiej, w którego zakresie koszty są akceptowalne.

Aby wspomóc proces projektowania wyróżniono trzy rodzaje konstrukcji lekkich ze względu na wpływ masy na koszty:

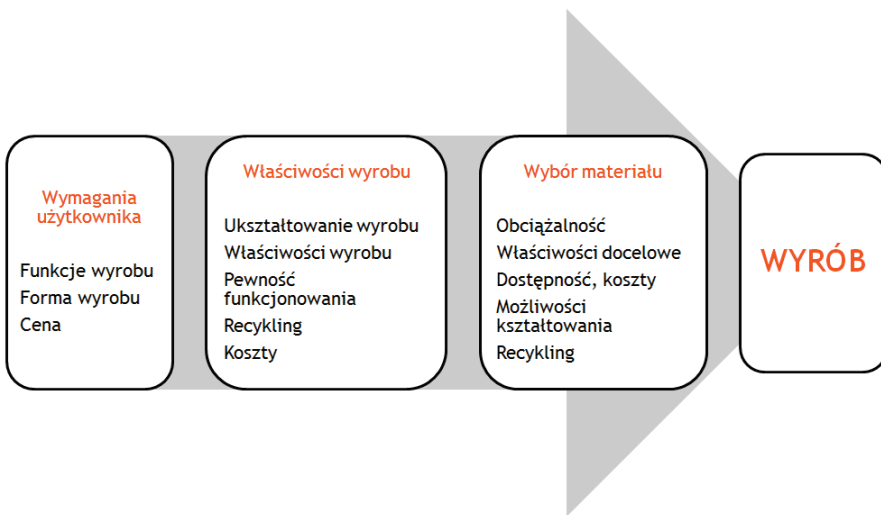
- oszczędna konstrukcja lekka,
- ekologiczna konstrukcja lekka,
- celowa konstrukcja ultralekka.

Oszczędna konstrukcja lekka ma na celu obniżenie kosztów całkowitych procesu produkcyjnego. Realizuje się to zazwyczaj przez obniżenie kosztów materiałowych w drodze wyboru odpowiedniego materiału oraz lepszego jego wykorzystania przez racjonalne odchudzenie konstrukcji. Lepsze ukształtowanie konstrukcji pociąga za sobą konieczność jej optymalizacji, co wpływa na zwiększenie kosztu procesów projektowania, który jest jednorazowy.

Natomiast celem nadrzędnym ekologicznej konstrukcji lekkiej jest uzyskanie jak największej oszczędności energii oraz osiągnięcie najwyższej możliwej redukcji kosztów energetycznych i środowiskowych użytkowania produktu. Z tego powodu zabiegi materiałowe i technologiczne schodzą na drugi plan. Jest to dominujący rodzaj konstrukcji lekkiej wykorzystywanej w przemyśle motoryzacyjnym, co jest spowodowane rosnącymi wymaganiami środowiskowymi stawianymi pojazdom.

Celowe konstrukcje ultralekkie stosuje się w przypadkach, gdy redukcja masy dominuje nad innymi kryteriami. Są to najczęściej precyzyjne urządzenia pomiarowe pracujące przy wysokich prędkościach obrotowych lub ogromne urządzenia o dużych momentach bezwładności. W tym przypadku kryteria kosztów eksploatacji oraz produkcji schodzą na drugi plan.

Często wymagania użytkownika wobec wyrobu końcowego wymagają zastosowania kilku strategii oraz powodują powstanie konstrukcji łączącej cechy konstrukcji oszczędnej oraz ekologicznej co zmusza projektanta do wyboru odpowiedniej metody konstruowania, przykładowy tok procesu przedstawiono poniżej (rys. 7).



Rys. 7. Schemat blokowy procesu projektowania konstrukcji lekkiej

6. NOWE TRENDY W MATERIAŁACH STOSOWANYCH W MOTORYZACJI

Wprowadzanie coraz nowszych materiałów do konstrukcji pojazdów mechanicznych jest związane z ciągłym rozwojem motoryzacji. Wzrost poziomu bezpieczeństwa oraz coraz nowsze elementy dodatkowego wyposażenia sprawiły, że w ciągu ostatnich 20 lat odnotowany został spory wzrost masy pojazdów, a co za tym idzie zwiększenie zużycia paliwa oraz wzrost emisji spalin. Stosując nowe materiały konstrukcyjne należy pamiętać, że zmniejszenie masy pojazdu nie może być celem nadrzędnym. Konieczne jest utrzymanie bezpieczeństwa oraz właściwości wytrzymałościowych na tym samym poziomie. Przy wszelkich modyfikacjach istotnym elementem jest również koszt ich wprowadzenia, ponieważ nawet najlżejszy materiał, który będzie odpowiednikiem obecnie stosowanego, nie zostanie wdrożony do konstrukcji jeżeli przez to cena pojazdu wzrośnie kilkukrotnie.

Już przy wstępnej fazie projektowania pojazdu uwzględnia się właściwości poszczególnych materiałów, z których zostaną wykonane odpowiednie elementy pojazdu. Dużym powodzeniem cieszą się te, które charakteryzują się mniejszą gęstością, większą wytrzymałością oraz mają lepsze właściwości użytkowe. Ich stosowanie nie tylko zmniejsza znacząco masę pojazdy, ale obniża zużycie paliwa oraz ogranicza emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Z powodzeniem mogą być one stosowane do produkcji elementów wchodzących w skład tzw. strefy zgniotu pojazdu, bardzo ważnej pod względem zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom.

Innym aspektem, który w ostatnich latach stał się bardzo ważny oraz modny, jest dbałość o środowisko, a dokładniej mówiąc zmniejszenie wytwarzania materiałów odpadowych mających na nie destrukcyjny wpływ. Poprzez zastosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych nie tylko wydłużają się okresy pomiędzy naprawami pojazdów, ale również zmniejsza się obciążenie środowiska, które jest szczególnie narażone poprzez proces likwidacji zużytych części, elementów czy też całych samochodów. Istotną sprawą jest aby recykling w przemyśle motoryzacyjnym odbywał się bardzo sprawnie, dlatego coraz częściej stosowane są materiały o dużej biodegradowalności. Niestety rozwiązania ekologiczne, pomimo tego, że mają coraz więcej zwolenników oraz są coraz częściej narzucane przez UE (poprzez różne dyrektywy), nie zawsze są najtańszymi. Sprzyjają one znaczącemu zwiększeniu się kosztów produkcji pojazdu, które nie zawsze zdążą się zwrócić w trakcie okresu eksploatacji.

7. STALE I STOPY ALUMINIUM

Najpopularniejszym materiałem stosowanym głównie do budowy konstrukcji pojazdów była i jest do tej pory stal. Obecnie nie są to typowe gatunki stali, lecz nowe o lepszej energochłonności czy wytrzymałości. Istotnym jest, aby przez odpowiedni sposób łączenia czy formowania stali zmniejszyć masę pojazdu. Jest to o tyle ważne, ponieważ stanowi ona nawet do 45% szkieletu nadwozia. Formowanie profili stal-

wych, czy ich zgrzewanie, a także walcowanie blach o różnych grubościach nie stanowi problemu. Często wykorzystywane jest też tłoczenie czy hydroformowanie. Te wszystkie metody pozwalają zaoszczędzić nawet 20–25% na masie nadwozia pojazdu mechanicznego.

Aluminium ma największe znaczenie w budowie pojazdów samochodowych. Występuje ono jako stopy z krzemem, miedzią, niklem, magnezem czy manganem. Stopy aluminium charakteryzują się małym ciężarem właściwym oraz dużą wytrzymałością mechaniczną. Są one również dobrymi przewodnikami cieplnymi przy niskiej rozszerzalności cieplnej. Co istotne, są bardzo odporne na zużycie korozyjne i eksploatacyjne. Dzięki tym właściwościom zastosowanie stopów aluminium w pojeździe pozwala nie tylko obniżyć znacząco masę samochodu, zachowując wszystkie parametry bezpieczeństwa, ale również zmniejszyć zużycie paliwa oraz emisję spalin. Stopy aluminium znajdują zastosowanie przy budowie nadwozi pojazdów, błotników, dachów czy pokryw silnika. Ich zastosowanie umożliwi zmniejszenie masy pojazdu nawet o 40%. Aluminium jest bardzo atrakcyjnym materiałem również pod względem ekologicznym. Recykling tego materiału można przeprowadzać praktycznie w nieskończoność. Stopy aluminium są oczywiście o wiele droższe od stali, jednak w sumarycznym rozrachunku wad i zalet są one korzystniejsze.

8. MAGNEZ, MATERIAŁY CERAMICZNE, TWORZYWA SZTUCZNE

Nowe możliwości odlewania elementów cienkościennych, które pozwalają uzyskać grubość ścianek nawet do 1,5 mm, spowodowały znaczny wzrost zainteresowania stopami magnezu. Główną przyczyną stosowania magnezu w przemyśle motoryzacyjnym jest jego gęstość, bowiem wynosi ona $1,74 \text{ g/cm}^3$. Niestety stopy magnezu charakteryzują się również podatnością na korozję oraz obniżoną wytrzymałością, przez co znajdują zastosowania prawie wyłącznie w elementach szkieletowych pojazdów (np. szkielet koła kierowniczego, fotela). W przypadku samochodów sportowych wchodzi w skład niektórych elementów kadłubów czy skrzyni biegów. Wykorzystując odlewanie ciśnieniowe podczas którego połączone zostaną ze sobą stopy magnezu i aluminium pozwala na zredukowanie masy kadłuba silnika nawet o 25%. Dodatkowo ta technologia zapewnia wytrzymałość i szczelność elementu.

Materiały ceramiczne są wykorzystywane do budowy katalizatorów i świec zapłonowych oraz tarczy hamulcowych. Cechuje je duża kruchość i twardość oraz znaczna odporność na korozję. Zazwyczaj są dobrymi izolatorami cieplnymi i elektrycznymi. Niestety materiały ceramiczne wymagają specjalnych technik wytwarzania z powodu złych właściwości technologicznych. Znalazły one zastosowanie w motoryzacji ze względu na kilka ciekawych właściwości z punktu widzenia inżynierskiego (twardość, odporność na wysokie temperatury i ściskanie oraz korozję). Przy gęstości wynoszącej ok. 5 g/cm^3 ich wytrzymałość na rozciąganie jest porównywalna do żeliwa. Niekorzystne cechy ceramiki to niska plastyczność, kruchość oraz wcześniej wspomniane trudne procesy technologiczne. Biorąc pod uwagę wszystkie cechy dodatnie i ujemne

stosowanie materiałów ceramicznych w motoryzacji pozwala na wykorzystanie zrobionych z nich elementów w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Dodatkowo tarcze hamulcowe wykonane z materiałów ceramicznych mogą być nawet o połowę lżejsze od standardowych.

Tworzywa sztuczne znajdują zastosowanie w wykończeniu wnętrza pojazdów. Jedną z głównych zalet jest ich mały ciężar właściwy, lecz wadą konieczność stosowania w temperaturach nie przekraczających 200 °C. Warto zwrócić uwagę na rozwój w zastosowaniu tych materiałów. Obecnie ponad 300 elementów w standardowym samochodzie jest wykonana z tworzyw sztucznych, co daje masę nawet do 100 kg. Biorąc pod uwagę ich ciężar właściwy i zastąpienie nimi metali uzyskujemy znaczne obniżenie masy pojazdu oraz oszczędność w spalaniu paliwa.

9. PODSUMOWANIE

Obecnie do budowy pojazdów wykorzystuje się materiały stalowe, aluminiowe oraz inne np. ceramiczne czy kompozytowe (rys. 8). Właściwości fizyczne nie są jedynym ważnym wyznacznikiem wykorzystania materiału do budowy danego podzespołu. Działania proekologiczne czy energooszczędne powinny być prowadzone już na etapie wstępnego projektowania pojazdu, a także obejmować kolejne cykle poprzez jego eksploatację aż do likwidacji. Znaczący wpływ na jego wybór ma cena, jednak coraz częściej zwraca się uwagę na biodegradowalność materiału.



Rys. 8. Zastosowane materiały w konstrukcji samochodu

Z biegiem lat więcej środków przeznaczana się na badania nad nowymi typami materiałów, które mają być bardziej przyjazne środowisku, a jednocześnie stanowić dobry zamiennik obecnie stosowanych. Mówiąc, że dany materiał jest ekologiczny, nie ograniczamy się tylko do recyklingu. Nowoczesny materiał powinien już na etapie produkcyjnym spełniać normy ochrony środowiska.

Przemysł motoryzacyjny to bardzo duży obszar, w którym nadal można dokonywać zmian. Inżynierowie i konstruktorzy stają przed coraz trudniejszymi zadaniami dotyczącymi nie tylko spełnienia dyrektyw UE dotyczących ekologii, ale również zaprojektowania nowych materiałów zapewniających lepsze właściwości pojazdu (trakcyjność, energooszczędność, komfort jazdy itp.). Kiedyś połączenie dbałości o środowisko z motoryzacją było zadaniem praktycznie niewykonalnym, lecz dziś jest ono realizowane, co więcej z coraz lepszymi rezultatami.

LITERATURA

- [1] OCZOŚ K., KAWALEC A., *Kształtowanie metali lekkich*, PWN, Warszawa 2012.
- [2] ASHBY M., SHERCLIFF H., CEBON D., *Inżynieria materiałowa*, Galaktyka, Łódź 2011.
- [3] FELD M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, WNT, Warszawa 2012.
- [4] IDZIOR M., *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii*, *Metrol.*, 2007, 9, 72–87.

Jakub BIERNACKI*
Marek MYSIOR*

STRUKTURA UKŁADU NAPĘDOWEGO POJAZDU PNEUMATYCZNEGO *PNEUMOBIL*

Obecnie, duży nacisk kładziony jest na rozwój alternatywnych paliw, szczególnie dla niewielkich pojazdów poruszających się w miastach. Jednym z potencjalnych rozwiązań jest użycie do tego celu sprężonego powietrza. W studenckim kole naukowym „Hydro +” uważamy, że jest to najlepsza alternatywa dla benzyny i prądu elektrycznego. Ideą tworzonego przez nasze koło pojazdu „Pneumobil” jest wykorzystanie sprężonego powietrza do napędzania pojazdu o napędzie pneumatycznym przy zastosowaniu silowników jednoczołczyskowych dwustronnego działania. Generuje to problemy z zamianą ruchu posuwistego na obrotowy. W artykule zaprezentowana została struktura układu napędowego i rozwiązania które mają na celu wygenerowanie jak największej sprawności i mocy z posiadanych komponentów. Na końcu przedstawione zostały plany rozwoju pojazdu pneumatycznego w najbliższych latach.

1. WSTĘP

Początki pojazdów pneumatycznych sięgają XIX wieku. W roku 1879 w Nantes powstała pierwsza linia produkcyjna lokomotyw parowych, którą można uznać za prekursora pojazdów pneumatycznych [1]. Wykorzystywała ona rozgrzaną parę do napędzania turbiny. W XIX wieku nastąpił gwałtowny rozwój pojazdów parowych, a w konsekwencji również pojazdów pneumatycznych. Największą różnicą pomiędzy wspomnianymi pojazdami jest różny sposób wytwarzania ciśnienia. Jednym z pierwszych i najciekawszych pomysłów na wykorzystanie pojazdów pneumatycznych była sieć tramwajów wymyślona przez francuza polskiego pochodzenia, Ludwika Mękarskiego [2]. Ideą tych tramwajów było zasilanie ze zbiorników powietrza zamontowanych w tramwaju i napełnianych na stacjach końcowych. Zbiorniki były napełniane do ciśnienia 30 bar, a ciśnienie pracy wynosiło 6 bar. Tramwaje te pokonywały ustaloną trasę w ciągu 40 minut ze średnią prędkością 9 km/h, a tankowanie trwało 20 minut [2]. Pomimo postępu prac nad napędami pneumatycznymi, Świat skierował się w stronę pojazdów spalinowych, a następnie elektrycznych.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Hydro Plus, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Pojazdy pneumatyczne są jednymi z najbardziej ekologicznych jakie człowiek do tej pory wymyślił [3]. Sama praca ich silników nie generuje żadnych zanieczyszczeń, a komponenty składowe całego układu napędowego są proste w konstrukcji i nadające się do recyklingu w przeciwieństwie do samochodów elektrycznych, których akumulatory i materiały wykorzystane w ich budowie stanowią poważny problem dla środowiska [1]. Nad pojazdami z napędem elektrycznym mają również bardzo ważną przewagę w postaci zdecydowanie krótszego czasu ładowania.

2. SILNIKI PNEUMATYCZNE

Silnik jest najważniejszym elementem każdego pojazdu. To od niego w głównej mierze zależą osiągi takie jak uzyskiwana moc czy moment napędowy. Silniki pneumatyczne dzielą się na siłowniki i silniki obrotowe [4].

Najczęściej używanymi siłownikami są siłowniki tłoczyskowe. Główną ich zaletą jest nieskomplikowana budowa, która pozwala uzyskać wysoką sprawność objętościową. Niestety zamiana ruchu postępowego na obrotowy, który potrzebujemy na kołach, generuje dodatkowe straty. Z kolei silniki obrotowe zużywają bardzo dużo powietrza, ponieważ mają niską wydajność objętościową która wynika ze skomplikowania uszczelnienia takich silników [5].

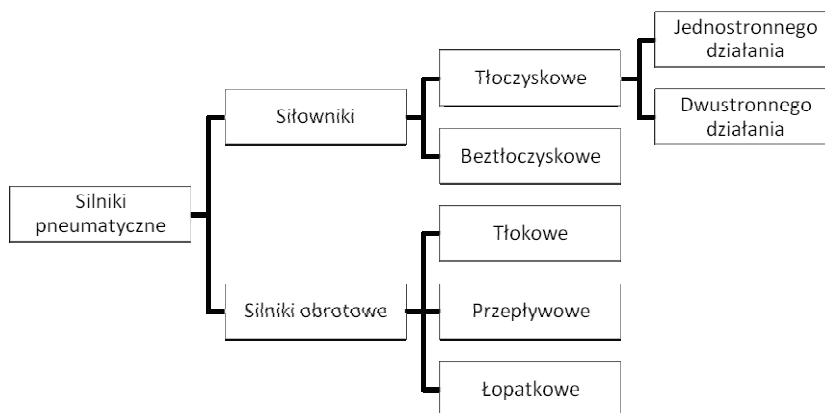
Siłowniki pneumatyczne stosuje się głównie w przemyśle i w różnego typu pojazdach, na przykład w układach zawieszenia. Zazwyczaj do takich celów wykorzystuje się siłowniki tłoczyskowe jedno lub dwustronnego działania [3]. Różnica pomiędzy tymi dwoma typami siłowników jest niewielka. W siłownikach jednostronnego działania ruch roboczy jest wykonywany przez sprężone powietrze, a ruch powrotny przez na przykład element sprężynujący, natomiast w siłownikach dwustronnego działania oba kierunki ruchu zapewnia sprężone powietrze [6].

Siłowniki pneumatyczne stosuje się nie tylko w pojazdach. W przemyśle mogą one również zapewniać transport elementów czy nawet narzędzi. Stosuje się wtedy siłowniki innej budowy takie jak siłowniki beztłoczyskowe. Jak sama nazwa wskazuje nie posiadają one tłoczyska tylko sam tłok, który połączony jest zazwyczaj magnetycznie do wózka i porusza się wzdłuż siłownika. Taka budowa ogranicza nam siłę jaką jest w stanie przenieść siłownik, ale pozwala na zmniejszenie wielkości całego układu i umożliwia zatrzymanie tłoka w dowolnej pozycji [5].

Silniki pneumatyczne obrotowe mają wiele zastosowań zaczynając od modeli samolotów na młotach udarowych kończąc. Najczęściej używanymi silnikami pneumatycznymi obrotowymi są silniki przepływowe, tłokowe i łopatkowe [4]. Schematyczny podział silników pneumatycznych przedstawiony jest na rysunku 1.

Silniki przepływowe czyli inaczej turbinowe posiadają specjalnie ukształtowaną turbinę, która napędza wał w niej osadzony gdy przepływa przez nią powietrze. Istnieje wiele rodzajów turbin do silników przepływowych. Wraz z rozwojem technik komputerowych CFD (*Computational Fluid Dynamics*) turbiny przyjmują coraz bardziej złożone kształty zwiększające ich sprawność [7]. Silniki przepływowe zużywają

bardzo dużo powietrza dlatego nie mogą być stosowane w pojazdach napędzanych ze zbiornika z uwagi na ograniczoną ilość zmagazynowanej energii.



Rys. 1. Podział silników pneumatycznych
[Źródło: opracowanie własne na podstawie [4]]

Silniki tłokowe charakteryzują się największą sprawnością objętościową wśród wymienionych wyżej silników obrotowych. Ich budowa może być różna. Zazwyczaj produkuje się silniki tłokowe w układzie gwiazda posiadającą trzy lub pięć tłoków. Przekształcenie ruchu posuwisto-zwrotnego na obrotowy odbywa się za pomocą wału korbowego lub mechanizmu krzywkowego [4].

Silniki pneumatyczne łopatkowe są modyfikacją silników turbinowych. Posiadają jeden element ruchomy, którym są łopatki. Wał na którym znajdują się łopatki jest łożyskowany niesiowo w obudowie. Powoduje to zwiększenie przestrzeni po jednej stronie wału. Łopatki dostosowują się do kształtu obudowy dzięki sprężynom zamontowanym w wale. Silnik łopatkowy zużywa mniej powietrza niż przepływowy ale więcej niż tłokowy [4].

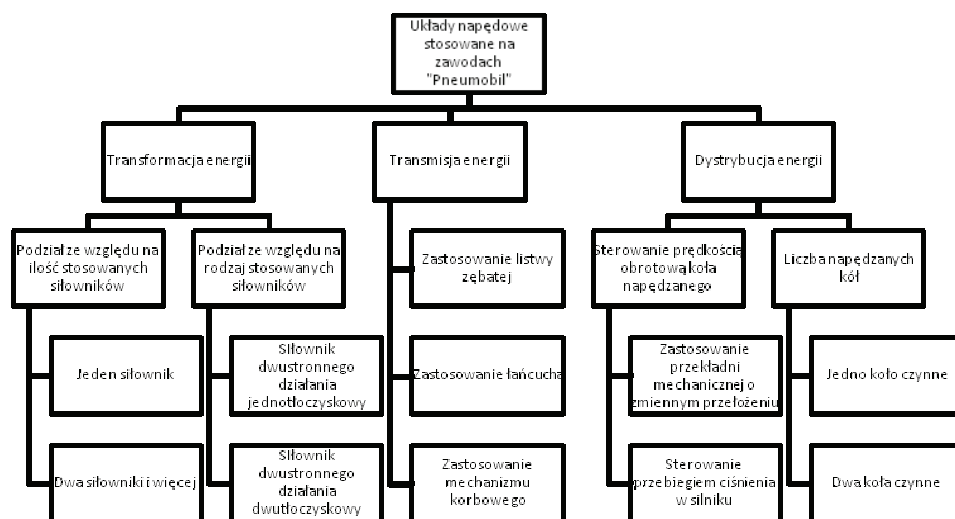
3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ STOSOWANYCH NA ZAWODACH *PNEUMOBIL*

Zawody Pneumobil, organizowane co roku od ośmiu lat w miejscowości Eger na Węgrzech, obfitują w różne rozwiązania konstrukcyjne układów napędowych pojazdów pneumatycznych. Cechą wspólną każdego rozwiązania jest źródło energii w postaci butli o pojemności 10 litrów wypełnionej sprężonym powietrzem pod ciśnieniem 200 barów, oraz zastosowanie przynajmniej jednego siłownika pneumatycznego stanowiącego podstawę układu napędowego. Różnice pomiędzy poszczególnymi konstrukcjami opierają się na różnych metodach zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego tłoczkowego na ruch obrotowy napędzanych kół. Poglądowy przegląd stosowanych rozwiązań przedstawiony jest na rysunku 2.

Jedną z głównych funkcji każdego układu napędowego jest transformacja energii. W przypadku pojazdów na sprężone powietrze, konieczna jest zamiana energii skompresowanego gazu na energię mechaniczną. Konstrukcje biorące udział w zawodach różnią się ilością i typem zastosowanych siłowników. Najczęściej stosowane są siłowniki jednotłoczkowe dwustronnego działania.

Kolejną z funkcji przedstawionego układu napędowego jest zamiana ruchu poswisto-zwrotnego tłocyska na ruch obrotowy koła napędowego. Stosowane konstrukcje realizują tę funkcję najczęściej poprzez zastosowanie listwy zębatej, mechanizmu korbowego lub rzadziej, poprzez zastosowanie łańcucha przymocowanego do tłocyska siłownika pneumatycznego, w tym przypadku dwutłoczkowego.

Dystrybucja energii określa liczbę kół napędowych w pojeździe. W stosowanych rozwiązaniach najczęściej napędzane jest jedno koło, nawet w przypadku pojazdów czterokołowych. Sterowanie prędkością obrotową koła (kół) czynnych, odbywa się to poprzez sterowanie ciśnieniem w siłowniku lub poprzez zastosowanie przekładni mechanicznej o zmiennym przełożeniu w postaci przekładni planetarnych umieszczonych w piastach koła napędowego lub też zastosowanie przekładni zębatych o zmiennym przełożeniu pomiędzy kołem napędowym a siłownikiem.



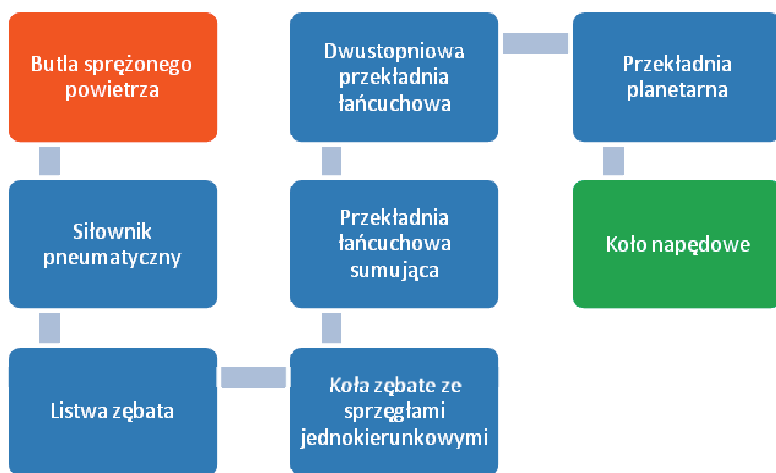
Rys. 2. Podział układów napędowych w konstrukcjach „Pneumobil”
[Źródło: opracowanie własne]

4. OPIS ZASTOSOWANEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Źródłem energii w naszym pojeździe jest butla o pojemności 10 litrów wypełniona sprężonym powietrzem pod ciśnieniem 200 bar. Dzięki zastosowaniu siłownika pneumatycznego, możliwa jest transformacja energii umożliwiająca ruch pojazdu. W budowanej przez Koło Naukowe Hydro+ konstrukcji zastosowano jeden siłownik pneumatyczny. Jest

to siłownik tłokowy, dwustronnego działania, dwupołożeniowy z ruchem posuwistym tłoczyska. Pozwala on na konwersję energii sprężonego gazu na energię mechaniczną ruchu posuwisto-zwrotnego zarówno podczas wsuwu, jak i wysuwu tłoczyska [6]. Zasada działania siłownika pneumatycznego opiera się na wytworzeniu różnicy ciśnień między komorą cylindra i tłoczyska co generuje siłę powodującą ruch elementów wykonawczych.

Kolejnym elementem stosowanego układu napędowego jest przekładnia zębata w formie listwy oraz dwóch kół zębatych, która odpowiada za zamianę ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu sprzęgieł jednokierunkowych ustawionych przeciwbieżnie. Moc z obu kół sumowana jest przez przekładnię łańcuchową. Zastosowanie kolejnej, tym razem dwustopniowej przekładni łańcuchowej, pozwala na zmniejszenie prędkości obrotowej koła napędowego, zwiększając tym samym moment napędowy. Dodatkowe umieszczenie przekładni planetarnej w piaście koła napędowego umożliwi regulację stosunku momentu do prędkości obrotowej w wygodny sposób przez kierowcę, co skutkuje lepszą charakterystyką całego układu napędowego. Cały układ napędowy omawianego pojazdu przedstawiony jest schematycznie na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu napędowego zastosowanego w omawianym pojeździe

Jedną z funkcji układu napędowego pojazdu jest zapewnienie wymaganej siły trakcyjnej. Dla uzyskania największego przyspieszenia pojazdu, jej wartość powinna być jak największa. Ma to szczególne znaczenie w konkurencjach *Arcade race* i *Acceleration race*. Siła generowana przez siłownik pneumatyczny zależy od dwóch czynników. Im większa jest różnica ciśnień pomiędzy dwoma komorami siłownika oraz im większa jest średnica tłoczyska, tym większa siła jest generowana. Zgodnie z zależnością dla siłowników z jednostronnym tłoczyskiem [4]:

$$P_{\text{wysuw}} = \frac{\pi}{4} [D^2 p_1 - (D^2 - d^2) p_0]$$

$$P_{\text{wsuw}} = \frac{\pi}{4} [(D^2 - d^2)p_1 - D^2 p_0]$$

W przypadku pojazdu pneumatycznego, ciśnienie p_0 równe jest ciśnieniu atmosferycznemu natomiast ciśnienie p_1 ograniczone jest do 10 bar (1 MPa). W związku z powyższym, celem uzyskania maksymalnej siły napędowej konieczne jest zapewnienie maksymalnej średnicy cylindra D .

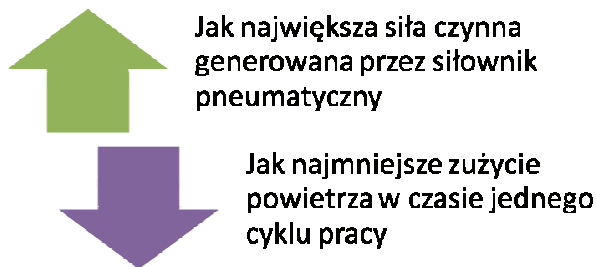
Kolejną ważną funkcją układu napędowego z punktu widzenia zastosowanego źródła energii w postaci sprężonego powietrza zgromadzonego w butli o określonej pojemności, jest uzyskanie jak najmniejszego zużycia gazu na jeden cykl pracy siłownika. Jest to szczególnie ważne na potrzeby konkurencji *Long Distance Race*. Zużycie powietrza w siłowniku pneumatycznym podczas jednego cyklu pracy ($V_{\downarrow 0}$) opisane jest wzorem (na podstawie [4], z pominiętymi objętościami szkodliwymi):

$$V_0 = \frac{p_1 T_0}{p_0 T_1} \cdot \frac{s\pi}{4} (D^2 + (D^2 - d^2))$$

gdzie:

- p_1 – ciśnienie sprężonego powietrza w siłowniku,
- p_0 – ciśnienie atmosferyczne,
- s – skok siłownika pneumatycznego,
- D – średnica cylindra,
- d – średnica tłoczyska,
- T_1 – temperatura sprężonego powietrza w siłowniku,
- T_0 – temperatura otoczenia.

Z powyższego wzoru wynika, że im większy jest skok siłownika i średnica cylindra (wymiary geometryczne siłownika) oraz różnica pomiędzy ciśnieniem w siłowniku, a ciśnieniem atmosferycznym podczas jednego cyklu pracy, tym większe jest zużycie powietrza przez zastosowany silnik pneumatyczny. W związku z powyższym, konieczne jest zapewnienie odpowiedniego wyważenia pomiędzy generowaną siłą czynną, która powinna być jak największa, oraz zużyciem powietrza, które powinno być jak najmniejsze. Stanowi to podstawę zagadnienia optymalizacyjnego w projektowaniu układu napędowego pojazdu pneumatycznego.



Rys. 4. Schemat zagadnienia optymalizacyjnego w projektowaniu układu napędowego pojazdu pneumatycznego napędzanego siłownikiem pneumatycznym

5. PODSUMOWANIE I PLANY NA PRZYSZŁOŚĆ

Zawody *Pneumobil* są doskonałym miejscem na sprawdzenie budowanych konstrukcji w realiach wyścigowych. Z powodu ograniczenia typu silnika pneumatycznego jedynie do siłowników, główne wysiłki wszystkich zespołów koncentrują się na sposobie zamiany ruchu posuwisto-zwrotnego na ruch obrotowy. Owocuje to mnogością rozwiązań mniej lub bardziej skutecznych, stanowiących pole wymiany doświadczeń między zespołami z całej Europy.

W przypadku omawianego pojazdu, wysiłki w konstruowaniu układu napędowego koncentrują się na zmniejszeniu zużycia powietrza przez siłownik, zapewniając tym samym jak większy zasięg pojazdu. Mając na uwadze podstawowe wzory i zależności przytoczone w rozdziale 4, konieczne jest odpowiednie dobranie rozmiarów oraz parametrów układu pneumatycznego pozwalającego na uzyskanie jak najlepszych osiągnięć przy zapewnieniu największego możliwego dystansu. Na chwilę obecną, zasięg pojazdu wynosi około 8000 m. W tegorocznej edycji zawodów zwycięska załoga z takiej samej ilości zużytego powietrza pokonała dystans 13 000 m, co ukazuje potencjał rozwojowy naszego projektu.

W najbliższej przyszłości planowane jest usprawnienie działania wielu podzespołów pojazdu, nie tylko układu napędowego, żeby uczynić pojazd jeszcze bardziej wydajnym. W swoim działaniu kierujemy się metodologią *PDCA*, omawianą na przykład w [8]. Cykl udoskonalający w naszym przypadku przedstawiony jest schematycznie na rysunku 5.



Rys. 5. Cykl PDCA dla projektu pojazdu pneumatycznego w kole Hydro+
[Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]]

LITERATURA

- [1] THIPSE S.S., *Compressed air car*, Tech Monit., 2008, s. 33–37.
- [2] PRENTICE J., *Compressed Air Trams*, [online], Available: <http://www.tramwayinfo.com/Defair.htm>, [dostęp: 6.07.2015].
- [3] IWASZKO J., *Pojazdy o napędzie pneumatycznym*, Pneumatyka, 2011, nr 1, s. 10–12.
- [4] SZEJNACH W., *Napęd i sterowanie pneumatyczne*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2014.
- [5] DINDORF Ł.P.R., *Manipulatory z kinematyką równoległą*, Pneumatyka, 2002, nr 6, s. 48–50.
- [6] STANISZEWSKI T., *Siłownik pneumatyczny z powietrzną „sprężyną” powrotną*, Pneumatyka, 2005, nr 6, s. 28–30.
- [7] GARDZILEWICZ L.P.Ś.J.K.K.A., *Badanie strat przepływowych w wieńcach łopatkowych stopni turbinowych z wykorzystaniem CFD. Część I. Metoda obliczeniowa*, Zesz. Nauk. Ciepl. Masz. Przepływowe – Turbomach., Politech. Łódzka, 2000, nr 117, s. 179–186.
- [8] MATSUO M., NAKAHARA J., *The effects of the PDCA cycle and OJT on workplace learning*, The International Journal of Human Resource Management, 2013, Vol. 24, No. 1, pp. 195–207.

*konstrukcja pojazdów, pojazd zeroemisyjny,
kriogine, rama nośna, aerodynamika,
projektowanie, analiza mes, inventor*

Daniel Marcin BRANDYK*

KONSTRUKCJA RAMY NOŚNEJ POJAZDU NAPĘDZANEGO CIEKŁYM AZOTEM

W artykule przedstawiono kompletny projekt ramy nośnej dla drugiej wersji pojazdu krioNginę, którego prototyp jest pierwszym w Polsce i Unii Europejskiej pojazdem napędzanym energią uzyskiwaną w efekcie odparowania ciekłego azotu. Pojazd skonstruowano w ramach prac badawczych Koła Naukowego Skrzyńeczka działającego przy Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. W ramach obecnie prowadzonych prac nad optymalizacją konstrukcji mającej na celu znaczące podniesienie sprawności, właściwości jezdnych i aerodynamicznych pojazdu opracowano między innymi projekt ramy nośnej.

Podstawowym założeniem teoretycznym jest stworzenie pojazdu, który będzie najszybszą na świecie maszyną napędzaną ciekłym azotem – KrioNginę speed version. Zgodnie z przyjętymi wytycznymi należało: w celu zapewnienia stabilności pojazdu w znaczącym stopniu obniżyć środek ciężkości oraz zapewnić stabilne mocowanie zbiornika ciekłego azotu; dla poprawy aerodynamiki oraz w celu zwiększenia sprawności wymiennika ciepła umieścić parownicę pod podłogą; w celu zmagazynowania rezerw mocy zapewnić miejsce na zbiorniki pełniące funkcję akumulatorów ciśnienia; dla zapewnienia bezpieczeństwa kierującego pojazdem wbudowanie w konstrukcję klatki bezpieczeństwa. W przedstawionym materiale opisano również metodologię prac nad konstrukcją oraz przedstawiono wyniki końcowe analizy MES, której używano w całym procesie projektowania. Ponadto w artykule poruszono zagadnienia związane z aerodynamiką pojazdu w odniesieniu do znanych konstrukcji samochodów, które były inspiracją podczas projektowania.

1. KONSTRUKCJA PROTOTYPU POJAZDU

Celem niniejszego artykułu jest omówienie założeń konstrukcyjnych oraz projektu ramy nośnej dla drugiej wersji pojazdu krioNginę. Przedstawiono proces konstrukcyjny od pierwszych założeń poprzez etap modelowania 3D, analizę modelu ramy metodą elementów skończonych (MES), po etap wykonawczy i zmiany wynikające z technologii wykonania.

* Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechnika Wrocławska Koło Naukowe Skrzyńeczka, 50-370 Wrocław ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, (+48) 723-338-512, skrzyńeczka@pwr.edu.pl

Ponadto dla lepszego zrozumienia zaprezentowanych rozwiązań przedstawiono zagadnienia związane z aerodynamiką pojazdu oraz omówiono konstrukcję pierwszej wersji pojazdu.

Prototyp skonstruowany ramach prac badawczych Koła Naukowego Skrzyńeczka działającego przy Wydziale Mechaniczno Energetycznym Politechniki Wrocławskiej jest pierwszym w Polsce i Unii Europejskiej pojazdem napędzanym energią uzyskiwaną w efekcie odparowania ciekłego azotu. Podstawowe założenia pierwszej konstrukcji to: zaprezentowanie idei zero emisyjnego napędu opartego na czynniku kriogenicznym, stworzenie stanowiska umożliwiającego badania i pomiary układu, zapewnienie stałego i nieograniczonego dostępu do wymiennika ciepła, uzyskanie możliwie wysokiego współczynnika omywania parownicy przez powietrze atmosferyczne oraz maksymalna prostota konstrukcji. Z tych powodów podczas budowy prototypu całkowicie pominięto aspekty związane z opracowaniem ramy nośnej pojazdu, do której stworzenia zaadoptowany został fiat 126 BIS. Z oryginalnej konstrukcji w celu zredukowania masy zostały usunięte wszystkie zbędne elementy. Zbiornik ciekłego azotu posadowiono na płycie usztywniającej zamocowanej w miejsce kana-py, aby to umożliwić należało usunąć tylną część dachu. Został on odcięty na wysokości środkowych słupków. Odcięta część dachu została przyspawana z przodu pojazdu i wykorzystana jako podparcie konstrukcji na której zawieszono wymiennik ciepła. Po zamontowaniu wymiennika powyżej dachu uzyskano pojazd o masie ok. 320 kg i następujących wymiarach: długość 3 m, szerokość 1,4 m, wysokość wraz z parownicą 2,4 m.



Rys. 1. Konstrukcja prototypu krioNgine

W ten sposób zrealizowano wszystkie przyjęte dla prototypu założenia konstrukcyjne niewątpliwą zaletą prototypu wzrost intensywności omywania wymiennika wraz ze wzrostem prędkości co zapewnia wystarczającą sprawność pomimo zwiększenia strumienia zimnego azotu przepływającego przez wymiennik.

Podstawowymi wadami są: wysoki współczynnik oporu aerodynamicznego, estetyka oraz mała stabilność pojazdu wynikająca z wysokiego posadowienia zbiornika o masie 285 kg przy całkowitym napełnieniu. W efekcie maksymalna odnotowana prędkość pojazdu wyniosła 37 km/h.

2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE DLA DRUGIEJ WERSJI POJAZDU

Badania i pomiary prototypu umożliwiły opracowanie założeń dla drugiej wersji pojazdu, który ma pobić światowy rekord prędkości pojazdów napędzanych ciekłym azotem. Obecny rekord został ustanowiony w USA i wynosi 87 km/h.

W celu poprawy właściwości jezdnych krioNginge przyjęto następujące założenia konstrukcyjne:

- uzyskanie możliwie niskiego współczynnika oporu aerodynamicznego C_x ,
- obniżenie środka ciężkości pojazdu i stabilizacja zbiornika,
- zapewnienie bezpieczeństwa dla kierującego pojazdem,
- zmniejszenie masy pojazdu,
- zapewnienie skutecznego omywania parownicy przez powietrze atmosferyczne,
- prostota wykonania,
- estetyka.

W trakcie opracowywania rozwiązania konstrukcji ramy nośnej przeanalizowano istniejące konstrukcje samochodów mając na względzie wszystkie powyższe wytyczne, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu geometrii pojazdu na wartość siły oporu aerodynamicznego D

$$D = C_x * \frac{\rho * \vec{v}}{2} * A_n \quad (1)$$

gdzie:

D – siła oporu aerodynamicznego.

C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego.

ρ – gęstość płynu (powietrza).

\vec{v} – prędkość opływu (prędkość ciała względem płynu).

A_n – rzut powierzchni na płaszczyznę normalną do wektora prędkości.

Mając na uwadze wartości współczynnika oporu aerodynamicznego dla różnych typów nadwozi samochodowych podjęto decyzję, że druga wersja pojazdu krioNginge będzie konstrukcją jednobryłową, ponieważ charakteryzują się one najniższą wartością współczynnika C_x .

Tabela 1. Wpływ elementów konstrukcyjnych na wartość C_x ¹

| Lp. | element konstrukcyjny | wpływ na wartość C_x |
|-----|---|------------------------|
| 1 | pochylenie pokrywy przedziału silnika | 46,5% |
| 2 | pochylenie przedniego pasa | 17,0% |
| 3 | zwężenie przodu i tyłu | 11,7% |
| 4 | pochylenie szyby tylnej | 11,5% |
| 5 | podcięcie tylnego słupka | 3,9% |
| 6 | związek pochylecia tylnej szyby i spojlera | 1,9% |
| 7 | związek pochylecia szyby przedniej i tylnej | 1,7% |

Konstrukcję podstawy jezdnej zaprojektowano jako kratownicę umożliwiającą niskie posadowienie zbiornika, montaż wymiennika ciepła pod podłogą pojazdu, co przy zastosowaniu wlotu z przodu i dodatkowych nawiewów z boku zapewni skuteczne omywanie parownicy, obniży środek ciężkości oraz poprzez ukrycie rurociągu zdecydowanie obniży wartość współczynnika oporu aerodynamicznego i poprawi estetykę pojazdu.

Jako materiał konstrukcyjny ze względu na prostotę wykonania przyjęto zamknięte profile stalowe.

Rys. 2. Przykład konstrukcji jednobryłowej – FSM Beskid²

3. KONSTRUKCJA RAMY NOŚNEJ, ANALIZA MES

Dla kratownicy ramy nośnej wymiarami determinującymi gabaryty są główne elementy konstrukcyjne pojazdu tj.:

¹ Za: K. Kobeszko, *Podstawy aerodynamiki pojazdów* <http://autokult.pl/2012/02/03/podstawy-aerodynamiki-pojazdow-cz-1-co-wplywa-na-opor-aerodynamiczny>

² Zdjęcie ze zbiorów własnych autora.

- zbiornik kriogeniczny firmy Taylor-Wharton XL 45 o wymiarach: średnica 508 mm, wysokość 1562 mm,
- główny wymiennik ciepła dla którego po badaniach i analizie parownicy w prototypie krioNginie przyjęto następujące założenia konstrukcyjne: wykonanie w formie węzownicy, minimalna długość prostego odcinka rury doprowadzającej azot do silnika 3000 mm.

Mając na uwadze cel jakim jest ustanowienie rekordu prędkości przyjęto dodatkowe założenia konstrukcyjne. Pojazd zostanie wykonany jako jednomiejscowy, w przedniej części pojazdu zamontowany zostanie wykonany z akumulator ciśnienia, dla zapewnienia przyczepności i odpowiedniej amortyzacji wykorzystane zostanie zawieszenie typu buggy. Poszycie ramy zostanie wykonane z lekkich materiałów. Wymiennik ciepła zostanie podzielony na dwie sekcje. Sekcja cieczowa (kriogeniczna) zostanie wykonana jako wymiennik przeciwprądowy typu rura w rurze, a gorącym ośrodkiem będzie azot wylotowy z silnika. Silnik zamontowany zostanie w tylnej części pojazdu za zbiornikiem ciekłego azotu.

Wilgotne pary azotu z pierwszej sekcji wymiennika zostają doprowadzone do wymiennika głównego.

Po przyjęciu wszystkich założeń konstrukcyjnych przy użyciu studenckiej wersji programu Autodesk Inventor 2014 utworzono model pojazdu. Po analizie wymiarowej, ocenie wizualizacji projektu pod względem funkcjonalności i estetyki i naniesieniu poprawek ramę nośną poddano analizie MES przy użyciu środowiska analiza ramy w programie Inventor.



Rys. 3. Model 3D drugiej wersji pojazdu krioNginie

Analiza metodą elementów skończonych (MES) przy wykorzystaniu systemów CAD jest dziś jednym z podstawowych narzędzi w praktyce inżynierskiej. Umożliwia jedno-

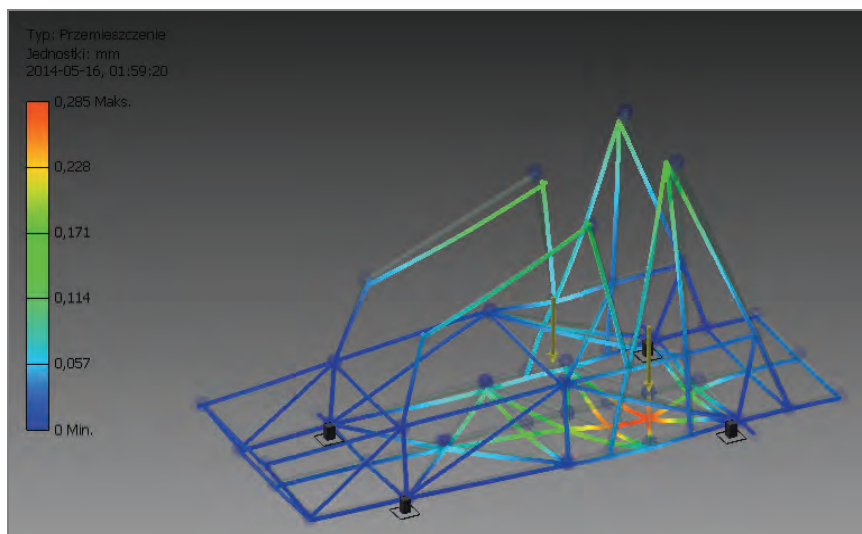
znaczną identyfikację miejsc i elementów przenoszących największe naprężenia i pozwala na dokładne określenie wielkości odkształceń jakim podlegają badane elementy.

Metoda elementów skończonych polega na podziale konstrukcji na skończoną liczbę prostych elementów o prostej geometrii. Następnie należy ustalić warunki brzegowe czyli wiązania pomiędzy elementami i obciążenia jakim podlegają. Na podstawie wprowadzonych danych zbudowany zostaje układ równań, który następnie zostaje macierzowo rozwiązany. Na podstawie wyników obliczane są przemieszczenia i odkształcenia oraz reakcje w podporach.

Poprzez wykorzystanie możliwości programów CAD w prosty i szybki sposób można zmieniać geometrię najbardziej obciążonych elementów zapobiegając już na etapie modelowania przeciążeniom konstrukcji.

Przeprowadzona w programie Inventor analiza ramy pojazdu krioN-gine umożliwiła zminimalizowanie masy pojazdu przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej sztywności konstrukcji. Pierwszy model został zaprojektowany na znormalizowanych zamkniętych profilach stalowych o wymiarach $60 \times 30 \times 3$ a jego masa miała wynieść ok. 190 kg.

W toku kolejnych zabiegów polegających na zmianie profili na mniejsze i powtórzeniu obliczeń masa ramy została zmniejszona do 82 kg i wykonana z profili prostokątnych $40 \times 20 \times 2$ i kwadratowych $20 \times 20 \times 2$ przy zachowaniu sztywności.



Rys. 4. Analiza MES ramy – odkształcenia

4. PODSUMOWANIE

Podczas wykonywania zaprojektowanej ramy głównej drugiej wersji pojazdu krioN-gine wprowadzono zmiany związane z technologią wykonania. Uproszczono większość połączeń profili, a w miejsce zamodelowanych połączeń wymagających docinania pro-

fili pod różnymi kątami wprowadzono dwustronnie podkładki technologiczne do których dospawano profile. Połączenia narożników zostały dodatkowo wzmocnione przez kątowniki. Takie rozwiązanie nie osłabia konstrukcji, a w znaczący sposób uprościło i przyspieszyło jej wykonanie. Jako efekt końcowy uzyskano ramę o masie 60 kg maksymalnej szerokości 1100mm długości 3400 mm i wysokości 1690 mm.

W porównaniu do konstrukcji prototypu zmniejszono masę ramy o ok. 200 kg wysokość zmniejszono o ok. 800 mm wydłużono o 400 mm przy tej samej szerokości. Wprowadzone zmiany zapewniają realizację wszystkich przyjętych założeń konstrukcyjnych dla ramy nośnej drugiej wersji pojazdu krioNGene.

LITERATURA

- [1] *Prof. mgr inż. Edward Habich Mechanika pojazdów w Techniczny poradnik samochodowy*
- [2] *Wybrane zagadnienia z mechaniki płynów z http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/wzzmp/cw_6_samochodzik.pdf*
- [3] *<http://autokult.pl/2012/02/03/podstawy-aerodynamiki-pojazdow-cz-1-co-wplywa-na-opor-aerodynamiczny>*

*konstrukcje dla pojazdów przyszłości,
ergonomia pasażerów, pojazd elektryczny,
skuter elektryczny*

Tomasz GODLEWSKI*
Zbigniew ŻELAZNY*
Wojciech PAWLAK*

BADANIA ERGONOMII PASAŻERÓW LEKKIEGO MOTOCYKLA ELEKTRYCZNEGO

Referat krótko wprowadza do zagadnienia Lekkiego Motocykla Elektrycznego i zawodów SmartMoto Challenge. Opisuje zagadnienia ergonomii ze szczególnym naciskiem na zagadnienia ergonomii szczególnie dotyczące konstruowania motocykli. Prezentuje specjalne stanowisko do badań ergonomii kierowcy motocykla, skonstruowane przez studentów Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych. Zaprezentowane są również wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku z grupą potencjalnych użytkowników Lekkiego Motocykla Elektrycznego. Na zakończenie opisuje wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań, oraz wyznacza dalsze kroki przy konstrukcji motocykla na zawody SmartMoto Challenge 2014. Dodatkowo zaprezentowany został plan na rozwinięcie stanowiska i kolejne analizy ergonomii pasażerów motocykla

1. WSTĘP

Lekki Motocykl Elektryczny jest projektowany z myślą o udziale w ogólnoeuropejskich zawodach Smart Moto Challenge organizowanych przez uczelnię w Barcelonie. Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych już po raz drugi projektuje i buduje motocykl na te zawody. Podczas pierwszej edycji w 2013 roku drużynie reprezentującej Politechnikę Wrocławską z Lekkim Motocyklem Elektrycznym 2013 [1] udało zająć się 3 miejsce na podium.

1.1. LEKKI MOTOCYKL ELEKTRYCZNY 2014

W 2014 w większości nowy zespół, już po raz drugi przygotowuje motocykl na zawody w Barcelonie. Głównym zadaniem w jest zaprojektowanie oraz skonstru-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

owanie prototypu lekkiego motocykla elektrycznego, napędzanego za pomocą silnika BLDC zamontowanego w piaście tylnego koła. Motocykl musi spełniać wymogi kategorii L1E (motoroweru) oraz w zakresie bezpieczeństwa. Przepisy zawodów zawężają grupę docelowych odbiorców przyszłego motocykla do studentów. Dodatkowym ograniczeniem jest obowiązek używania baterii oraz silnika dostarczonego przez jednego ze sponsorów zawodów, firmy Elmoto. Podczas konkurencji oceniane są konstrukcja, wykonanie i osiągi i parametry jezdne motocykla. Poza tym sędziowie oceniają również metodologie projektowania oraz faza przygotowania projektu oraz analizę rynku i możliwości sprzedaży wykonaną przez uczestniczące zespoły.

Na pierwszym etapie projektu, użyto technik heurystycznych oraz tablic morfologicznych w celu znalezienia najlepszej koncepcji. Dzięki nim określono podstawowe cech pojazdu zespołu Politechniki Wrocławskiej:

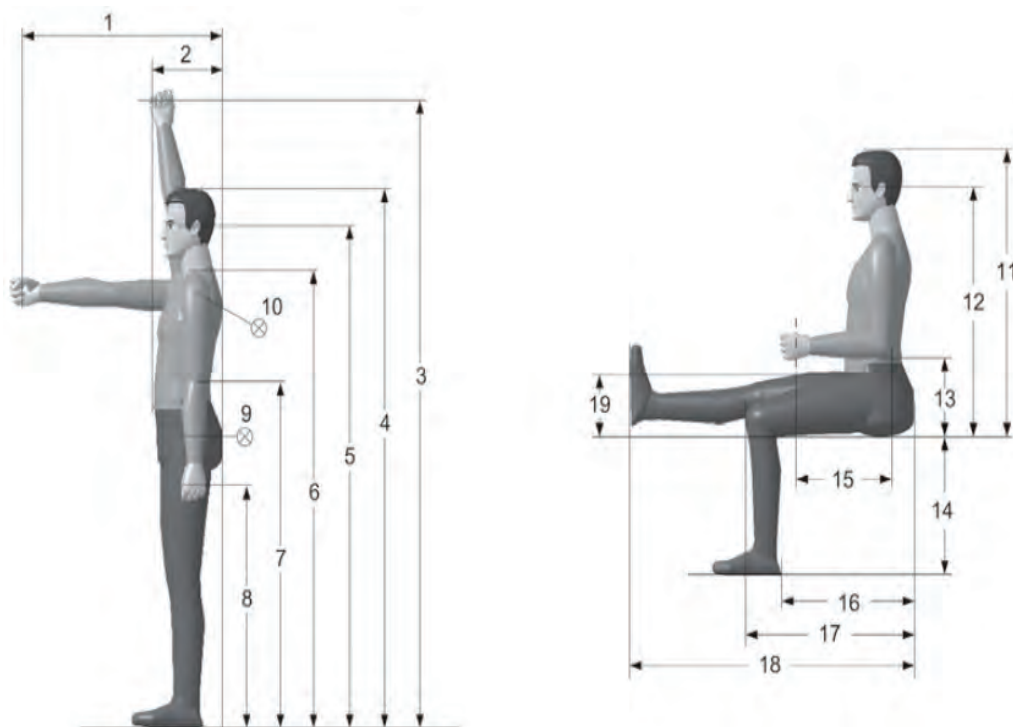
- koła o rozmiarze 20 cali,
- maksymalna prędkość ograniczona do 45 km/h,
- bateria umieszczona między nogami, w możliwie najniższym punkcie,
- masa pojazdu poniżej 60 kg,
- możliwość przewożenia 2 pasażerów, w układzie 1+1,
- dopuszczalna masa całkowita 200 kg,
- amortyzowane zawieszenie koła przedniego i tylnego,
- prostota, niski koszt produkcji i eksploatacji.

1.2. ERGONOMIA MOTOCYKLA

Podstawowym zadaniem ergonomii, jako nauki jest przystosowywanie urządzenia technicznego do psychofizycznych właściwości budowy ciała człowieka [2]. Biorąc pod uwagę cechy anatomiczne (rys. 1) takie jak masa, wymiary kończyn, czy predyspozycje fizyczne, konstruktorzy motocykla mogą kształtować przestrzeń i elementy używane przez kierowcę i pasażera, tak, aby zapewnić możliwie największą satysfakcję i komfort użytkownika motocykla. Właściwa pozycja i łatwość obsługi znacząco poprawiają bezpieczeństwo podczas użytkowania jednoślada.

Uwzględnione, więc zostały różnice w budowie człowieka. Założono, że motocykl będzie użytkowany przez osoby od 5 centyla damskiego aż po 95 centyl męski. Tabela 1 przedstawia wymiary antropometryczne, które brano pod uwagę podczas projektowania.

Jak można zauważyć, różnice pomiędzy wymiarami potencjalnych użytkowników są bardzo duże, przykładowo różnica wzrostu to 33 cm. W przypadku motocykla, gdzie przeważnie nie istnieje możliwość regulacji pozycji siedziska, stanowi to duży problem konstrukcyjny i wymaga odpowiedniego podejścia projektowego.



Rys. 1. Punkty antropometryczne na ciele człowieka, wg normy DIN 33 402 [3]

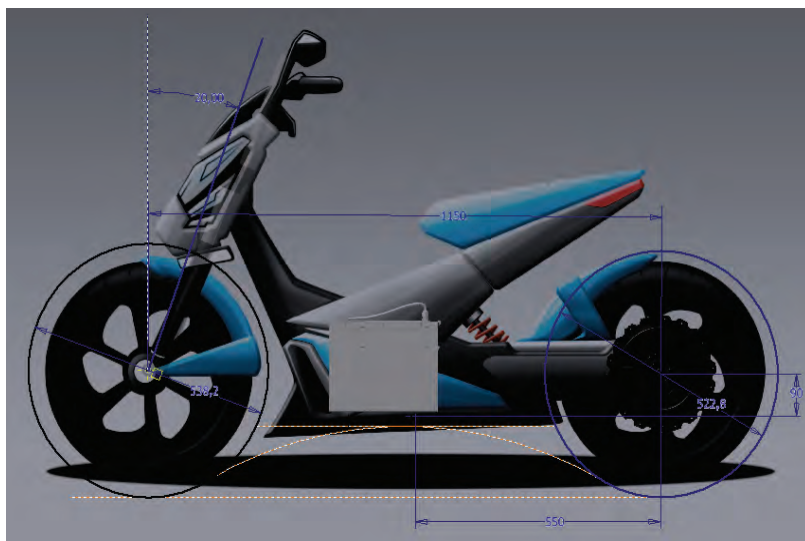
Tabela 1. Wybrane punkty antropometryczne DIN 33 402 [3]

| Centyl | Waga [kg] | 1 [mm] | 3 [mm] | 4 [mm] | 5 [mm] | 8 [mm] | 11 [mm] | 14 [mm] | 16 [mm] |
|----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Kobieta – 5 | 51 | 616 | 1748 | 1510 | 1402 | 664 | 805 | 351 | 426 |
| Mężczyzna – 95 | 85 | 787 | 2210 | 1841 | 1721 | 828 | 962 | 480 | 552 |

2. BADANIA ERGONOMII MOTOCYKLA

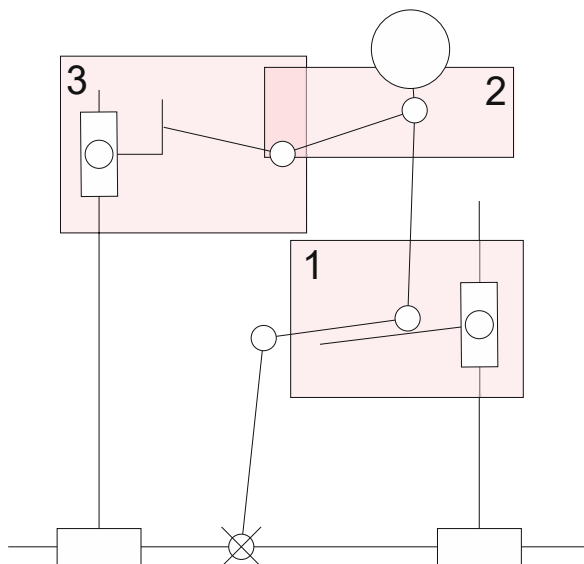
Podstawowe założenia pozwoliły na wykonanie wstępnych obliczeń i pierwszych szkiców ramy, które zostały użyte do badań ergonomii. Określona forma motocykla pozwoliła na wstępne oszacowanie podstawowych wymiarów motocykla (rys. 2).

Dane te zapewniły podstawy do zaprojektowania stanowiska do badania ergonomii kierowcy lekkiego motocykla elektrycznego (rys. 3). Zbudowane stanowisko zostało wykorzystane do badań ergonomii. Zaprojektowane je tak by umożliwić zmianę wszystkich podstawowych parametrów charakteryzujących pozycje kierowcy motocykla (wysokość, odległość siedziska, kąt pochylenia siedziska, wysokość odległość oraz kąt pochylenia kierownicy.) W celu ustalenia potrzebnego zakresu regulacji po-



Rys. 2. Wstępne szkice podstawowych elementów motocykla

szczególnych elementów, utwierdzono punkt kontaktu stóp modelu odpowiadającemu 50 centylowi mężczyemu w określonym punkcie. Następnie wyznaczono możliwe zakresy ruchu 1, 2, 3 (rys. 3) odpowiadające odpowiednio punktom charakteryzującym biodra, ramiona oraz dłonie kierowcy. W oparciu te zakresy, określono wymiary i możliwości regulacji stanowiska.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania ergonomii motocykla z zaznaczonymi podstawowymi zakresami ruchu

Na tak przygotowanym stanowisku została przebadana grupa 10 uczestników projektu (rys. 4). 8 mężczyzn oraz 2 kobiety. Każdy z nich miał za zadanie zająć wygodną dla siebie pozycję.



Rys. 4. Badanie przyszłych użytkowników na stanowisku do ergonomii

Jako punkt referencyjny użyto punktu przy stopie użytkowników. Wyniki pomiarów są przedstawione w tab. 2. i tab.3.

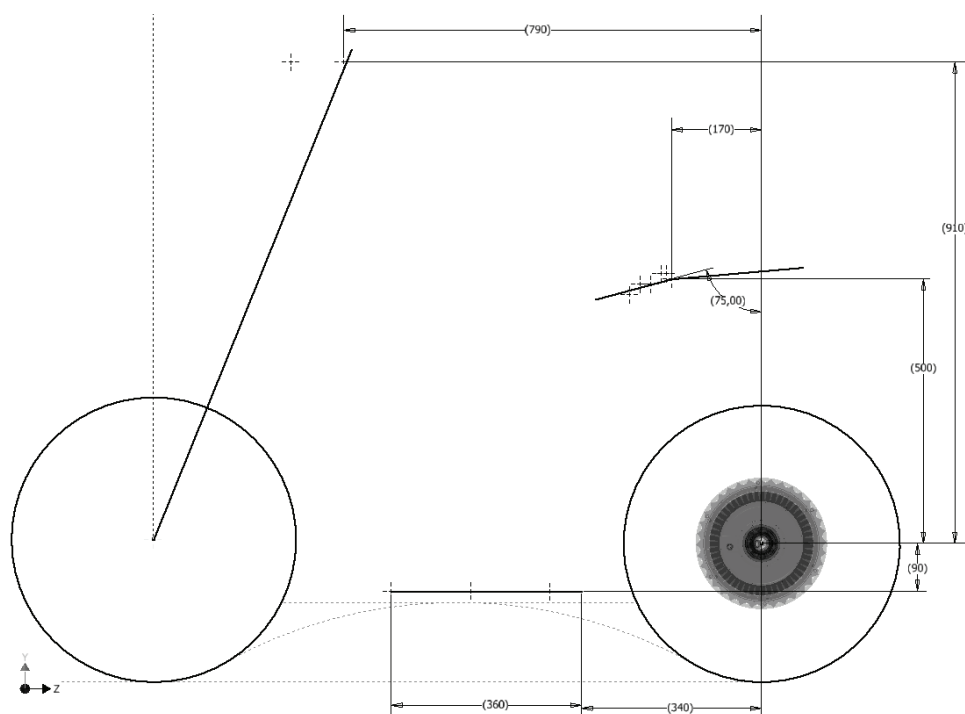
Tabela 2. Wyniki badań ergonomii na stanowisku grupy mężczyzn

| | Wymiary Kierowcy | | | Pozycja | | | |
|-----|------------------|------------|------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | | | | Siedzisko | | Kierownica | |
| | Wzrost [cm] | 11 [cm] | 18 [cm] | Odległość [cm] | Wysokość [cm] | Odległość [cm] | Wysokość [cm] |
| M-1 | 175 | 84 | 58 | 32 | 56 | 34 | 100 |
| M-2 | 175 | 82 | 60 | 30 | 55 | 34 | 100 |
| M-3 | 178 | 84 | 60 | 36 | 59 | 34 | 100 |
| M-4 | 178 | 87 | 66 | 37 | 60 | 33 | 100 |
| M-5 | 182 | 90 | 58 | 36 | 59 | 34 | 100 |
| M-6 | 182 | 88 | 64 | 36 | 59 | 34 | 100 |
| M-7 | 184 | 90 | 67 | 37 | 60 | 33 | 100 |
| M-8 | 191 | 95 | 70 | 38 | 61 | 34 | 104 |

Tabela 3. Wyniki badań ergonomii na stanowisku grupy kobiet

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| K-1 | 170 | 81 | 55 | 32 | 56 | 34 | 100 |
| K-2 | 180 | 100 | 55 | 34 | 58 | 34 | 100 |

Otrzymane wyniki pomiarów zostały zebrane w chmurę punktów, następnie wprowadzone do oprogramowania komputerowego. Pozwoliło to na wyznaczenie pozycji kierownicy, pozycji oraz pochylenia siedziska. Określone również zostało miejsce podparcia stóp (rys. 5). Zbiór zebranych danych pozwolił na wyznaczenie wysokości i odległości siedziska. Wyjątkowo istotnym parametrem z racji na brak możliwości regulacji położenia siedziska w motocyklu okazał się kąt pochylenia siedziska. Zauważono, że niżsi kierowcy siadają bliżej oraz niżej. Co więcej z badań wynika, że zmiana wysokości siedziska może być określona liniową zależnością w odniesieniu do wzrostu kierowcy. Dzięki naniesieniu tych informacji na rysunek, można było graficznie wyznaczyć optymalny kąt opadania siedziska wynoszący 15° . Pochylenie siedziska motocykla pod takim kątem pozwoli na zajęcie optymalnej pozycji, użytkownikom o zróżnicowanej budowie.



Rys. 5. Wyniki otrzymane z analizy badań na stanowisku ergonomicznym

3. WNIOSKI I KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ

Specjalnie zaprojektowane i zbudowane stanowisko do badań ergonomii umożliwiło wykonanie badań ergonomii z grupą potencjalnych przyszłych użytkowników lekkiego motocykla elektrycznego. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na znalezienie zależności między wygodną pozycją użytkownika a jego wzrostem. Wiedza ta daje

podstawy do odpowiedniego kształtowania przestrzeni użytkownika motocykla, oraz do odpowiedniego projektowania poszczególnych elementów motocykla. Otrzymane dane przeniesiono do wirtualnego środowiska komputerowego wspomagania projektowania, umożliwiającego ocenę komfortu użytkownika oraz kontrole zasięgu i widoczności kierowcy pojazdu. Opracowane dane będą również wykorzystane do zaprojektowania elementów motocykla.

W przyszłym roku zespół Koła Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych planuje zaprojektowanie stanowiska, które umożliwi badanie ergonomii zarówno kierowcy jak i pasażera motocykla.

LITERATURA

- [1] LOCHERT M., *Conceptual design of light electric motorcycle*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska 2013.
- [2] WRÓBLEWSKA M., *Ergonomia*, Politechnika Opolska, 2004.
- [3] TRZESNIEWSKI M., *Rennwagentchnik*, Vieweg+Teubner, 2008.

*zjawisko Seebecka, ciepło odpadowe,
ekologiczny akumulator*

Dariusz IWĄŃSKI*

POZYSKANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z CIEPŁA ODPADOWEGO W POJEŹDZIE NAPĘDZANYM CIEKŁYM AZOTEM

W artykule przedstawiono pomysł ideowy na stworzenie alternatywy dla tradycyjnego akumulatora w oparciu o zbudowany przez Koło Naukowe Skrzyneczka pojazd krioNgine napędzany ciekłym azotem, a właściwie skutkiem jego przemiany fazowej. Ekologiczny akumulator będzie wykorzystywał zjawisko konwersji ciepła na prąd elektryczny w oparciu o efekt Seebecka z wykorzystaniem materiałów termoelektrycznych oraz bazując na powstawaniu niskiej temperatury w parowniku pojazdu. Uzyskanym napięciem będzie zasilany układ oświetleniowy pojazdu.

WSTĘP

Ciepło odpadowe to temat, który ostatnio zyskuje coraz większe zainteresowanie nie tylko w środowisku akademickim, ale również wśród producentów oraz klientów na tle podjętych działań w kierunku szerszego wykorzystania i optymalnego rozwoju alternatywnych źródeł energii, oraz ze względów czysto ekonomicznych i ekologicznych. Jako przykład można wskazać amerykańską firmę General Motors, która otrzymała dotację od Ministerstwa Energetyki USA na badania nad stworzeniem prototypu silnika SMA (Shape Memory Alloy) dokonującego konwersji energii cieplnej wytwarzanej przez silniki spalinowe. Obecnie ciepło odpadowe ma głównie zastosowanie w procesie podgrzania ciepłej wody użytkowej lub wody służącej do centralnego ogrzewania, jednak nie jest to jedyny sposób możliwego jego wykorzystania. Od XIX wieku dzięki odkryciu dokonanego przez niemieckiego fizyka Thomasa Johanna Seebecka, znana jest także metoda wytwarzania energii elektrycznej z ciepła.

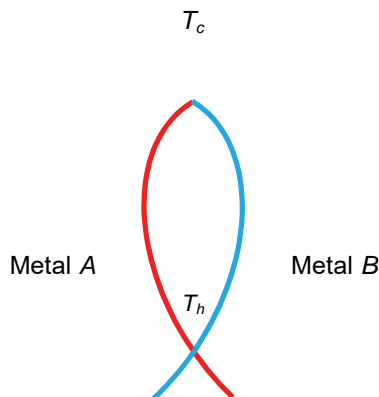
Zawarta w referacie treść będzie egzemplifikacją zjawiska Seebecka, jednakże nadrzędnym celem jest przedstawienie założeń projektu wykorzystania procesu parowania ciekłego azotu do stworzenia „ekologicznego akumulatora” w pojeździe

* Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, Koło Naukowe Skrzyneczka,
e-mail: dariusz.iwanski@ymail.com

kriogenic, zamiana energii cieplnej w energię elektryczną i dobranie odpowiednich elementów układu oświetleniowego pojazdu ze względu na pożądaną do uzyskania moc elektryczną.

1. ZWIĄZEK MIĘDZY CIEPŁEM ODPADOWYM A ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ

Ciepło odpadowe to ciepło powstające w procesach przetwarzania energii w układzie i oddawane do otoczenia, bardzo często niewykorzystywane w pełni. Na przykład ciepło z procesów chłodzenia, ciepło spalin odlotowych z silnika spalinowego lub pieca hutniczego. Niemniej jednak ciepło, jako postać energii, może zostać poddane konwersji na inny rodzaj energii zgodnie z naszą intencją, w tym na energię elektryczną. Sposób takiej konwersji opisuje zjawisko Seebecka polegające na powstaniu siły termoelektrycznej w układzie ze złączy dwóch różnych (metali) przewodników lub półprzewodników umieszczonych w różnych temperaturach. W momencie zamknięcia takiego obwodu charakterystycznym zjawiskiem jest powstanie SEM i przepływ prądu. Dzieje się tak dlatego, iż zastosowane przewodniki w układzie umieszczone w różnych temperaturach, charakteryzują różne poziomy energetyczne elektronów przewodnictwa. Połączenie przewodników powoduje przepływ elektronów z jednego (ciepłego) przewodnika do drugiego (zimnego). W ten sposób powstaje napięcie kontaktowe i utrzymuje się ono aż do momentu, gdy poziomy Fermiego dla elektronów (maksymalne wartości poziomów energetycznych elektronów) uzyskają względem siebie stan równowagi, tzn. będą sobie równe.



Rys. 1. Termopara utworzona przez połączenie dwóch metali A i B.
Źródło: opracowanie własne KNS

Wartość siły elektromotorycznej SEM E_c opisuje równanie:

$$E_c = \alpha_{a,b}(T_h - T_c) \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha_{a,b}$ – współczynnik Seebecka dla obwodu uwarunkowany typem przewodnika a i b oraz temperaturą, V/K,

T_h, T_c – temperatura spoiny gorącej i zimnej, K.

W warunkach laboratoryjnych badając termogenerator półprzewodnikowy dla którego współczynnik Seebecka wynosił $\alpha_{a,b} = 4,13 \cdot 10^{-4}$ V/K, różnica temperatur była rzędu 27,5 K i przy stałym jednoczesnym minimalnym obciążeniu uzyskano najwyższą moc elektryczną $P_{el} = 0,12960$ W. Natomiast dla tego samego termogeneratorsa, ale dla mniejszej różnicy temperatur rzędu i także przy stałym minimalnym obciążeniu, najwyższa wartość uzyskanej mocy elektrycznej wynosiła $P_{el} = 0,02560$ W.

Tabela 1

| R, Ω | $\Delta T, K$ | U, V | I, A | P_{el}, W |
|-------------|---------------|--------|--------|-------------|
| 1 | 12 | 0,16 | 0,16 | 0,0256 |
| | 27,5 | 0,36 | 0,36 | 0,1296 |

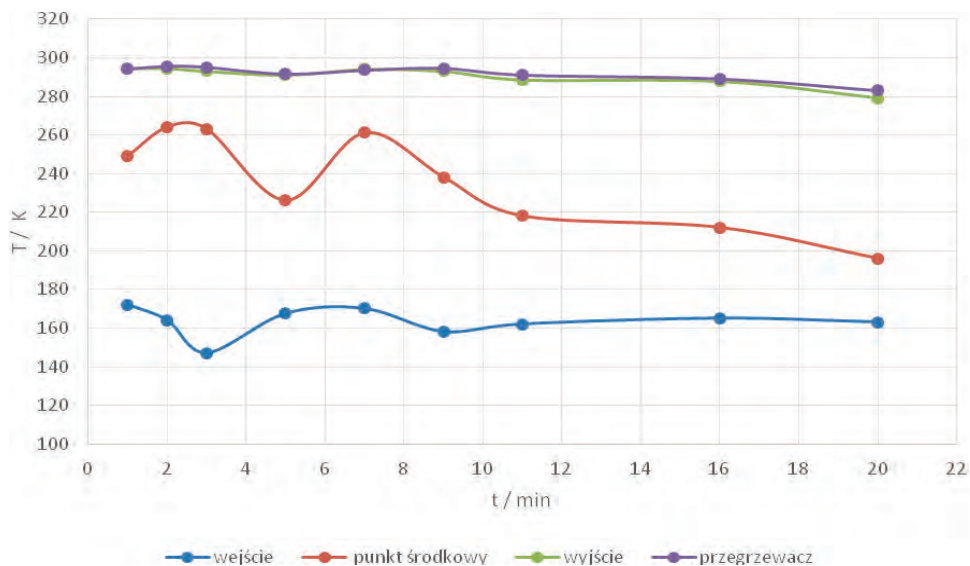
Źródło: Opracowanie własne KNS

Aby otrzymać większą moc P_{el} , należy wykorzystać przede wszystkim większą różnicę temperatur oraz dobrać odpowiedni materiał złączy ze względu na właściwy współczynnik Seebecka – mogą to być materiały przewodnikowe, półprzewodnikowe lub nadprzewodnikowe, te ostatnie charakteryzują się zerową rezystancją wewnętrzną i obecnie stosowane są głównie w układach kriogenicznych.

2. CIEKŁY AZOT. ŹRÓDŁO NISKICH TEMPERATUR

Pojazd krioNginie napędzany jest ciekłym azotem, którego temperatura w zbiorniku kriogenicznym XL 45 CE z systemem podtrzymywania ciśnienia wynosi ok. 125 K. W momencie dostarczania ciepła z otoczenia ciekły azot zmienia swoją fazę na gazową, oraz przegrzewa do temperatury w przybliżeniu równej temperaturze otoczenia. W parowniku przez który przepływa azot następuje korzystny rozkład temperatury, który na podstawie konwersji możemy zmienić na uzyskanie napięcia zasilającego układ oświetleniowy pojazdu.

Zgodnie z widocznymi danymi na wykresie 1, najbardziej korzystny rozkład temperatury jest na wejściu do parownika z uśrednioną wartością $T = 165$ K. Jeśli dodatkowo weźmiemy pod uwagę średnią roczną temperaturę na przykład dla 2014 roku w województwie dolnośląskim, która oscylowała w przedziale od 283,15 K do 285,15 K, to uzyskujemy średnią różnicę temperatur rzędu 120–118 K, a więc większą ponad 4-krotnie od uzyskanej różnicy w przeprowadzonym badaniu laboratoryjnym.



Wykres 1. Temperatry wymiennika napędu krioNgine.
Źródło: opracowanie własne KNS

3. SPOSÓB DOBORU MATERIAŁÓW TERMOLELEKTRYCZNYCH

Kwestia doboru właściwych materiałów jest istotnym elementem przy realizacji projektu. Obecnie przydatność materiałów termoelektrycznych ocenia się na podstawie kryterium wartości współczynnika dobroci termoelektrycznej Z , który łączy 3 parametry charakteryzujące termoelektryki:

- współczynnik Seebecka α ,
- rezystywność ρ ,
- przewodność cieplna λ .

Dla pojedynczego materiału współczynnik Z określa równanie:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (2)$$

W przypadku budowy termopar z 2 różnych materiałów A i B , współczynnik Z_{AB} wyznacza się dla całego układu zgodnie ze wzorem:

$$Z_{AB} = \frac{(\alpha_A + \alpha_B)^2}{(\sqrt{\lambda_A \cdot \rho_A} + \sqrt{\lambda_B \cdot \rho_B})^2} \quad (3)$$

Obecnie układy przedstawiane w literaturze opisane są wartościami Z na poziomie $10^{-2} \div 10^{-3} K^{-1}$. Materiał o dobrych własnościach termoelektrycznych powinien posiadać duży współczynnik Seebeck'a (taki jaki mają przewodniki i izolatory), dużą prze-

wodność elektryczną (taką jaką mają metale) oraz powinien wykazywać się małą przewodnością cieplną.

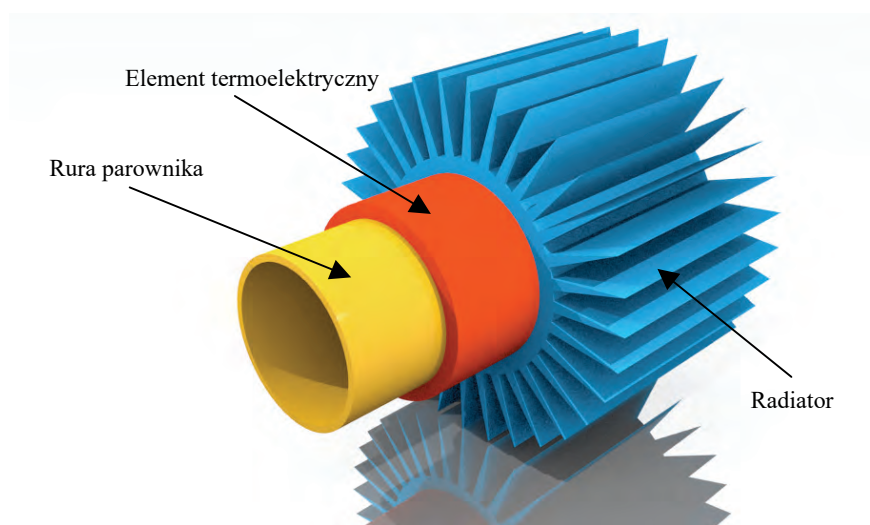
Dodatkowym kryterium przydatności jest sprawność konwersji definiowana jako udział, lub inaczej stosunek, energii dostarczonej do układu do energii zaabsorbowanej przez „gorące” złącze termopary:

$$\eta = \frac{(T_H - T_C) \cdot (\gamma - 1)}{(T_C + \gamma \cdot T_H)} \quad (4)$$

gdzie $\gamma = \sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_H + T_C}{2}}$.

Dla aktualnie istniejących technologii oraz materiałów sprawność waha się między 0,04% a 3%. Dlatego, aby zwiększyć siłę termoelektryczną, termopary można połączyć elektrycznie w szereg, tworząc tzw. termostos.

Poniżej przykładowa propozycja elementu zbierającego energię elektryczną z parownika. Aspektem przemawiającym do budowy takiego układu jest dość duża dostępność elementów składowych oraz prostota konstrukcji. Dzięki temu możemy budować modułowe elementy do poboru prądu wg średnicy rury parownika.



Rys. 2. Propozycja elementu do poboru energii elektrycznej. Źródło: materiały własne KNS

Obecnie istnieje szeroki wachlarz materiałów termoelektrycznych, wśród których można wymienić metale, materiały kompozytowe, materiały na bazie pierwiastków grupy IV, materiały na bazie pierwiastków grupy V oraz VI, PGEC (phonon-glass, electron-crystal), TAGS (Te-Ag-Ge-Sb), przewodzące materiały organiczne, materiały tlenkowe oraz materiały funkcjonalnie gradientowe. Z uwagi na zakres temperatur w jakim będziemy pracować, najlepszym wyborem wstępnym są materiały kompozytowe typu „E” ($\text{Ni}_{80}\text{Cr}_{20} - \text{Cu}_{62}\text{Ni}_{38}$) o następujących parametrach:

- a) $\alpha = 54 \mu\text{V/K}$,
 b) $\rho = 4 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$,
 c) $W = \alpha^2 \cdot \rho = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ W/K}^2 \cdot \text{m}$.

4. UKŁAD OŚWIETLENIOWY POJAZDU KRIONGINE.

Na rynku możemy spotkać bardzo szeroki rodzaj oferowanych przez producentów lamp oświetleniowych. Do jednych z nich należą żarówki LEDowe zyskujące coraz większe zainteresowanie wśród konsumentów, ponieważ charakteryzują się bardzo niskim poborem mocy z jednej strony, a z drugiej – w porównaniu do świetlówek kompaktowych – pozbawione są efektu migotania i po włączeniu od razu świecą pełną mocą.

Tabela 2. Źródło: opracowanie własne KNS

| Żarówki tradycyjne | Żarówki halogenowe | Świetłówki kompaktowe | Żarówki LED | Strumień świetlny w lumenach (lm) |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------------|
| 25 W | 18 W | 6 W | 3 W | 220 lm |
| 40 W | 28 W | 8 W | 5 W | 415 lm |
| 60 W | 42 W | 12 W | 7 W | 710 lm |
| 75 W | 52 W | 16 W | 9 W | 930 lm |
| 100 W | 70 W | 21 W | 12 W | 1340 lm |

Zakładamy wstępnie użycie 2 żarówek samochodowych LED H1 12 SMD 5050 producenta H.I.D. Żarówki charakteryzują się niskim poborem mocy rzędu 3,6 W oraz standardowym napięciem zasilania 12 V.

Potrzebujemy zatem uzyskać moc rzędu 7,5 W, aby układ oświetleniowy zadziałał prawidłowo, co wydaje się celem możliwym do osiągnięcia.

5. PODSUMOWANIE.

Do głównych zalet pomysłu zbudowania „ekologicznego akumulatora” można wymienić przede wszystkim brak występowania w urządzeniu generującym napięcie trujących substancji, tj. elektrolitów, które występują w standardowych akumulatorach, a także bezobsługowość oraz prostota konstrukcji i działania. Natomiast w przypadku wad na pierwsze miejsce wysuwa się oczywiście niską sprawność, która przedstawia projekt na płaszczyźnie ekonomicznej w mało atrakcyjny sposób, bowiem musi ona być zrekompensowana przez użycie większej ilości materiałów termoelektrycznych.

W zaprezentowanym materiale świadomie pominięto wiele innych zagadnień i aspektów związanych z podjętym tematem z uwagi na fakt, iż projekt stworzenia „ekologicznego akumulatora” jest jeszcze głównie w fazie ideowej. Jako przykład

takiego przemilczanego tematu jest chociażby efekt Thompsona, czy efekt Peltiera (odwrotny do efektu Seebecka) i związany z nim ciekawy materiał termoelektryczny, zwany ogniwem Peltiera. Dodatkowo w kwestii poruszonych materiałów termoelektrycznych nie brane były pod uwagę nadprzewodniki, gdyż wykorzystywane są one głównie w okolicach temperatury 0 bezwzględnego.

Rozpoczęcie prac przewidziane jest na okres jesienny 2015 roku wraz z otwarciem kolejnego semestru akademickiego.

LITERATURA

- [1] KRÓLICKI Z., *Termodynamiczne podstawy obniżania temperatury*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [2] MARKOWSKI P., *Właściwości termoelektryczne kompozytów grubowarstwowych*, praca doktorska, promotor: dr hab. inż. Andrzej Dziedzic, prof. PWr, Wrocław 2008.

Jarosław KIJAKOWSKI*,
Zbigniew ŻELAZNY*

INERCYJNY SYSTEM NAWIGACJI W POJEŹDZIE AUTONOMICZNYM

W artykule zaprezentowano alternatywną, w stosunku do komercyjnych rozwiązań, koncepcję systemu pozycjonowania, cechującego się znacznie niższym kosztem, którego zasada działania opiera się na wykorzystaniu i przetworzeniu danych pochodzących z czujników inercyjnych, takich jak akcelerometr oraz żyroskop. Prace prowadzone w kierunku opracowania i faktycznego wdrożenia systemu były realizowane na potrzeby projektu Pierwszego Polskiego Pojazdu Autonomicznego, realizowanego przez koło naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, działające przy Politechnice Wrocławskiej. Przebieg prac oraz szczegółowy opis wykonanych badań nad systemem zostały opisane w dalszej części artykułu.

1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój technologii oraz niewiarygodny postęp informatyki z początku XXI wieku umożliwiły dokonanie w dziedzinie motoryzacji tego, co jeszcze kilkadziesiąt lat temu wydawało się niemożliwe. Samochód uznawany do tej pory jedynie za maszynę, której obsługa wymaga interwencji człowieka, staje się obecnie pojęciem coraz mniej aktualnym, zaś koncepcja pojazdów zdolnych do poruszania się bez udziału kierowcy zyskuje coraz bardziej na znaczeniu. Dzięki zaangażowaniu wiodących ośrodków akademickich na świecie, takich jak uniwersytet Stanford lub MIT w Stanach Zjednoczonych, oraz przy zainteresowaniu największych firm motoryzacyjnych, m.in. BMW i Mercedes Benz, rzeczywiste dowody potwierdzające słuszność tego twierdzenia poruszają się już po drogach publicznych. Przykładem tego mogą być samochody rozwijane przez firmę Google, które do tej pory przejechały łącznie ponad 500 000 km bez żadnej kolizji [1].

Skuteczność i bezpieczeństwo działania pojazdu autonomicznego stanowi wypadkową wielu ściśle współpracujących ze sobą układów, z których każdy ma znaczenie kluczowe dla poprawności funkcjonowania całego pojazdu. Do najważniejszych wy-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

zwań, związanych z projektowaniem i konstruowaniem samochodu zdolnego do poruszania się bez udziału kierowcy, należy niewątpliwie konieczność przeprowadzenia odpowiednich modyfikacji mechanicznych umożliwiających automatyczną realizację takich czynności jak skręcanie, hamowanie lub przyspieszanie. Kolejne ważne zagadnienie stanowi kwestia właściwego doboru komponentów systemu komunikacji z otoczeniem, odpowiedzialnego przede wszystkim za detekcję i rozpoznawanie przeszkód znajdujących się na drodze, oraz wykrywanie pasów jezdni i znaków drogowych. Do równie istotnych układów zastosowanych w pojeździe autonomicznym zalicza się system nawigacji. Poprawność lokalizowania samochodu w globalnym układzie odniesienia, zdolność manewrowania po rzeczywistych drogach oraz wyznaczanie optymalnej trasy przejazdu należą do podstawowych zadań modułu pozycjonowania. We wszystkich dotychczas zaprezentowanych pojazdach autonomicznych [2] realizowane jest to z wykorzystaniem skomplikowanych urządzeń, działających w oparciu o nawigację GPS, oraz inercyjny system nawigacji. Duża dokładność tego typu systemów wiąże się zawsze z ich bardzo wygórowaną ceną, których wartość nierzadko przekracza koszt zakupu konwencjonalnego samochodu.

2. PRZEBIEG PRAC NAD SYSTEMEM NAWIGACJI INERCYJNEJ

Głównym założeniem projektu Pierwszego Polskiego Pojazdu Autonomicznego jest jego niski koszt, toteż dobór komponentów wchodzących w skład systemu nawigacji pojazdu miał na celu minimalizację nakładów finansowych, związanych z instalacją urządzenia w samochodzie, przy jednoczesnym zachowaniu jak największej jego funkcjonalności. Zdecydowano, iż system będzie opierać się o sensory ruchu wykonane w technologii MEMS. Urządzenia z tej rodziny cechują się niską ceną [3], ponadto przy zachowaniu miniaturowych wymiarów rzędu kilkunastu milimetrów występują często w postaci modułowej, gdzie w skład jednego modułu wliczają się co najmniej dwa czujniki, przykładowo akcelerometr i żyroskop. Taki zestaw cech sprawia, iż ich instalacja w pojeździe nie jest kłopotliwa i nie wiąże się z dużymi kosztami.

2.1 CZUJNIK POŁOLU MINIMU-9 V2

Do prac nad systemem nawigacji inercyjnej wykorzystano czujnik *minIMU-9 v2* firmy *Pololu*. Jest to cyfrowy sensor MEMS składający się z trzech osobnych modułów: trójosiowego akcelerometru, trójosiowego żyroskopu oraz trójosiowego magnetometru. Dzięki takiemu rozwiązaniu położenie pojazdu może być opisane dziewięcioma niezależnymi parametrami, co zapewnia jego jednoznaczność. Najważniejsze parametry czujnika zawarto w tabeli 1.

Na podstawie powyższej specyfikacji stwierdzono, iż sensor może zostać z powodzeniem wykorzystany w pojeździe autonomicznym. Zakres pomiarowy wszystkich modułów jest większy niż przewidywane wartości wielkości mierzonych, zaś

duża czułość czujnika zapewnia wykrycie nawet najmniejszych zmian mierzonych parametrów samochodu. Toteż spodziewane przyspieszenia pojazdu, wynoszące maksymalnie ok. 2g, oraz zmiana położenia kąтового nieprzekraczająca podczas skrętu wartości $90^\circ/\text{s}$, mogą zostać skutecznie zarejestrowane przez czujnik. Dopuszczalna temperatura pracy sensora, mieszcząca się w przedziale od -40°C do 85°C , spełnia z dużym naddatkiem wymagania odnośnie warunków pracy, gdyż temperatura w pojeździe powinna mieścić się w zakresie od 0°C do 30°C . Ponadto częstotliwość próbkowania umożliwia wykonywanie pomiarów praktycznie w czasie rzeczywistym.

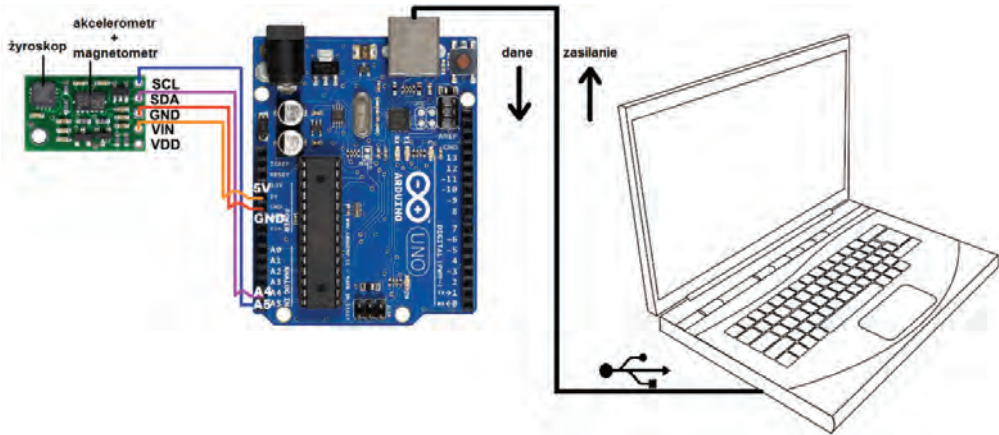
Tabela 1. Parametry czujnika minIMU-9 v2 [4]

| Połolu minIMU-9 | Żyroskop | Akcelerometr | Magnetometr |
|-----------------------|--|---|---|
| Zakres pomiarowy | $\pm 250, \pm 500, \pm 2000 \text{ deg/s}$ | $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16 \text{ g}$ | $\pm 1,3\text{--}\pm 8,1 \text{ gauss}^1$ |
| Czułość | $8,75\text{--}70 \text{ mdeg/s}$ | $1\text{--}12 \text{ mg}$ | $0,01\text{--}0,08 \text{ gauss}$ |
| Bias | $\pm 10, \pm 15, \pm 75 \text{ deg/s}$ | $\pm 60 \text{ mg}$ | b.d. |
| Nieliniowość | 0,2% zakresu | 0,2% zakresu | 0,2% zakresu |
| Wartość szumu | $0,03 \text{ deg/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ | $220 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ | b.d. |
| Zakres częstotliwości | 95/190/380/760 Hz | $1\text{--}5376 \text{ Hz}$ | $0,75\text{--}220 \text{ Hz}$ |
| Zakres temp. | $-40 + 85^\circ\text{C}$ | $-40 + 85^\circ\text{C}$ | $-40 + 85^\circ\text{C}$ |
| Rozdzielczość | 16 bitów | 12 bitów | 12 bitów |
| Napięcie zasilania | $2,4\text{--}3,6 \text{ V}$ | $2,16\text{--}3,6 \text{ V}$ | $2,16\text{--}3,6 \text{ V}$ |
| Pobór prądu | 6,1 mA | $110 \mu\text{A}$ | $110 \mu\text{A}$ |
| Wymiary | $12,7 \times 20,3 \times 2,5 \text{ mm}$ | | |
| Masa | 0,9g | | |
| Cena | 165 zł | | |

¹ Gauss – jednostka indukcji magnetycznej równa 10^{-4} T .

Dane z czujnika wysyłane są magistralą I²C, dlatego do ich obsługi zdecydowano się wykorzystać platformę Arduino Uno przeznaczoną do systemów wbudowanych. Wybrany model Arduino UNO R3 składa się z mikrokontrolera Atmega 328 z rodziny AVR, 14 pinów do obsługi wejść/wyjść cyfrowych oraz 6 wejść analogowych [5]. Wbudowany interfejs USB pozwala na bezpośrednie połączenie urządzenia z komputerem. Jediną funkcjonalnością Arduino w projekcie było pośredniczenie w komunikacji pomiędzy czujnikiem inercyjnym a komputerem, gdzie następowało przetworzenie odebranych danych. Na rysunku 1 zaprezentowano schemat ideowy połączenia czujnika z komputerem za pośrednictwem modułu Arduino.

Komunikacja urządzenia Arduino z sensorem odbywała się z wykorzystaniem programu dostarczonego przez producenta czujnika, zaś zasilanie doprowadzone zostało przez kabel USB. Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów przeprowadzono kalibrację czujnika. Pomiary prowadzono na zakresie pomiarowym $\pm 2 \text{ g}$ dla akcelerometru oraz $\pm 250^\circ/\text{s}$ dla żyroskopu. Wybór najmniejszych zakresów zapewnia największą czułość, cechując się jednocześnie najmniejszymi wartościami błędów.

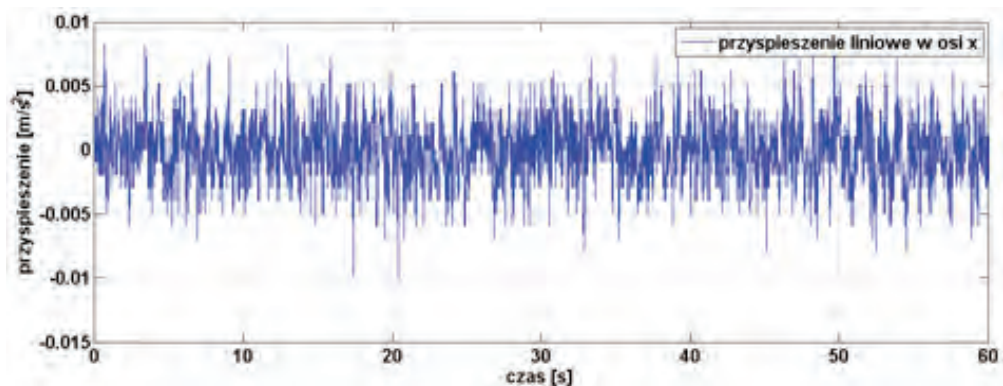


Rys. 1. Schemat połączenia opracowanego układu

Niestety wskazania opisanego czujnika, jak w przypadku każdego sensora z rodziny MEMS, obarczone są pewnym błędem. Największy problem stanowi przesunięcie składowej stałej żyroskopu oraz zaszumienie wskazań akcelerometru. Te cechy wpływają odpowiednio na dryft obliczonego kąta przechylenia, czyli liniowe odchylenie się od wartości mierzonej w funkcji czasu, oraz na pojawienie się zjawiska błędzenia losowego w przypadku określania przemieszczenia liniowego pojazdu. Mimo, iż ich wpływ na wyniki pomiarów wydaje się mało znaczący, należy pamiętać, że informacje o orientacji katowej pojazdu uzyskiwane są po scałkowaniu wskazań żyroskopu, zgodnie ze wzorem (1), zaś dane o przemieszczeniu liniowym samochodu to całka podwójna z odczytów akcelerometrów, na podstawie wzoru (2).

$$\theta = \int (\omega) dt \quad (1)$$

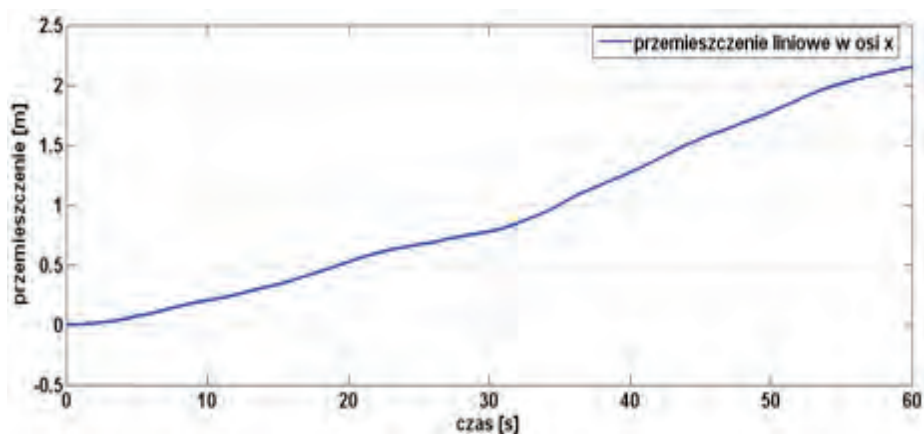
$$S = \int (V) dt = \int \left(\int (a) dt \right) dt \quad (2)$$



Rys. 2. Zaszumione wskazania akcelerometru przy zerowym przyspieszeniu

W wyniku przeprowadzenia tych operacji matematycznych, udział błędów w uzyskanych wynikach pomiaru rośnie liniowo w funkcji czasu dla żyroskopu, oraz kwadratowo dla akcelerometru, co sprawia, iż dane z czujników stają się zupełnie niewiarygodne już po pierwszych kilkunastu sekundach od rozpoczęcia pomiarów. W przypadku wskazań akcelerometru zjawisko to można zaobserwować na podstawie wskazań sensora przy zerowym przyspieszeniu działającym na czujnik, co obrazuje rysunek 2.

Powyższy wykres jest dowodem na obecność szumu losowego we wskazaniach akcelerometru. Powoduje on wahania pomiarów od $-0,005 \text{ m/s}^2$ do $0,005 \text{ m/s}^2$. Mimo, iż błąd tym spowodowany jest mały, jego wpływ na wskazania można zaobserwować w całym przedziale czasowym.



Rys. 3. Błądzenie losowe we wskazaniach przemieszczenia liniowego przy zerowym przyspieszeniu

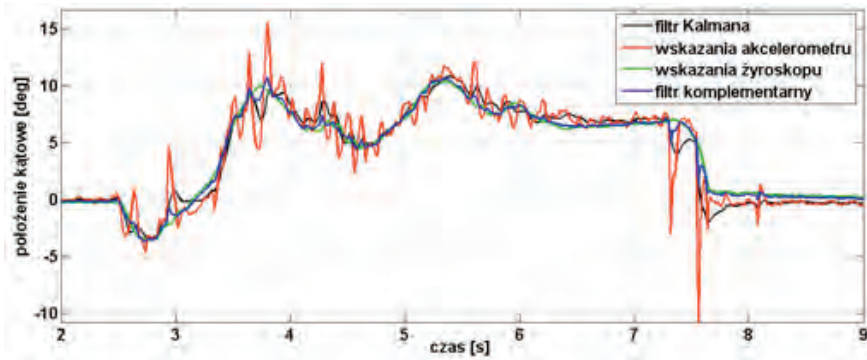
Zgodnie z omówioną wcześniej teorią, całkowanie zaszumionych wskazań akcelerometru powoduje pojawienie się zjawiska błądzenia losowego, którego udział we wskazaniach prędkości rośnie liniowo, natomiast w przypadku przemieszczenia rośnie on z kwadratem czasu. Błąd tym spowodowany jest bardzo widoczny na wykresach. Po upływie 60 sekund od momentu rozpoczęcia pomiarów wynosi ponad 2 metry. Zatem obliczanie przemieszczenia pojazdu na podstawie surowych wskazań akcelerometru staje się niewiarygodne już po upływie kilkunastu sekund.

2.2. METODY FILTRACJI WSKAZAŃ BADANEGO CZUJNIKA

Biorąc pod uwagę występowanie błędów we wskazaniach sensorów podjęto próby ich zminimalizowania wykorzystując metody przetwarzania danych, w tym przede wszystkim filtry cyfrowe. Zastosowano zarówno filtr komplementarny, jak również filtr Kalmana oraz filtr dolnoprzepustowy. Ich działanie testowano w celu określenia skuteczności estymacji orientacji oraz przyspieszenia liniowego pojazdu. Otrzymane wyniki badań posłużyły do oceny poprawności działania poszczególnych filtrów.

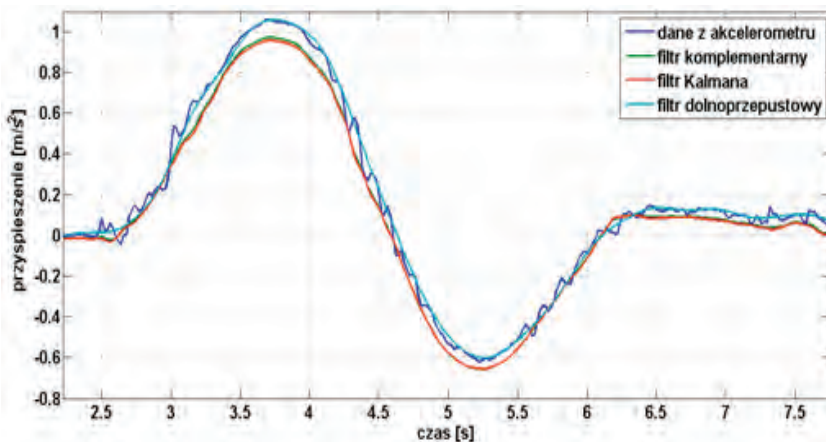
Do estymacji położenia kąowego pojazdu względem układu odniesienia wykorzystano dane z żyroskopu oraz akcelerometru. Przed implementacją filtrów, usunięto offset ze wskazań prędkości kąowej, czyli systematyczny błąd pomiaru, który przy tych samych warunkach pozostaje stały, po czym dokonano całkowania otrzymanego przebiegu, zgodnie ze wzorem (1). Następnie tak przygotowane dane poddano filtracji.

Rysunek 4 przedstawia przebieg położenia kąowego w funkcji czasu uzyskany na podstawie surowych danych z sensorów oraz po zastosowaniu omówionych filtrów cyfrowych.



Rys. 4. Estymacja położenia kąowego pojazdu względem osi x

Na podstawie przedstawionych wykresów zaobserwowano, iż wskazania akcelerometru cechują się dużymi zakłóceniami, natomiast dane z żyroskopu mają tendencję do dryftu. Filtr Kalmana minimalizuje skutecznie zaszumienie sygnałów akcelerometru, jak również całkowicie eliminuje zjawisko dryftu. Filtr komplementarny również redukuje szumy w sygnale wyjściowym, jednak nadal widoczny jest dryft w przebiegu charakterystyki.



Rys. 5. Estymacja przyspieszenia pojazdu

Skuteczność działania filtrów została również przetestowana w przypadku estymacji przyspieszenia pojazdu. W badaniach wykorzystano te same filtry, co poprzednio, oraz dodatkowo filtr dolnoprzepustowy. Efekty ich działania na danych z akcelero-
metru zostały przedstawione na rysunku 5.

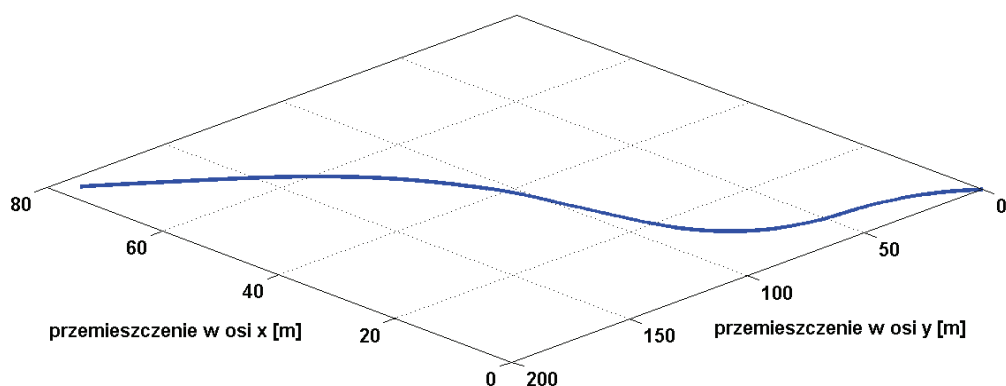
Na podstawie analizy wykresu, zaobserwowano, iż negatywny wpływ zakłóceń na pomiar został wyeliminowany po każdej metodzie filtracji. Najlepszy efekt uzyskano dla filtra dolnoprzepustowego, który prawie idealnie odwzorował rzeczywisty przebieg przyspieszenia, jednocześnie całkowicie minimalizując zaszumienie pomiarów.

3. TESTY NA OBIEKCIE RZECZYWISTYM.

W celu oceny możliwości implementacji sensorów w pojeździe autonomicznym, zdecydowano się przeprowadzić badania w samochodzie [6]. Testy polegały na wykonywaniu standardowych manewrów drogowych i jednoczesnej obserwacji przefiltrowanych wskazań czujników. Ich celem było dokonanie oceny skuteczności działania filtrów w rzeczywistych warunkach, w których pojazd narażony jest na różne wibracje, pochodzące m.in. z silnika.

Test 1 – Jazda po zadanej trajektorii

Celem testu było ocenienie w jakim stopniu droga estymowana na podstawie wskazań czujnika jest zbliżona do znanej trajektorii. Biorąc pod uwagę skuteczność filtra dolnoprzepustowego, zdecydowano się na jego wykorzystanie. Poniżej przedstawiono wykresy przemieszczenia liniowego pojazdu w osiach x i y , uzyskane po scałkowaniu wskazań akcelero-
metru według wzoru (2).



Rys. 6. Przemieszczenie pojazdu estymowane na podstawie wskazań akcelero-
metru

Na podstawie uzyskanego przebiegu przemieszczenia pojazdu można stwierdzić, iż w pierwszej fazie ruchu wykonał on delikatny skręt w lewo, po czym przeszedł

w łagodny skręt w prawą stronę. Końcowa faza ruchu pojazdu to jazda po szerokim łuku. Całkowita długość wektora przemieszczenia w osiach x i y samochodu jest równa 210 metrów



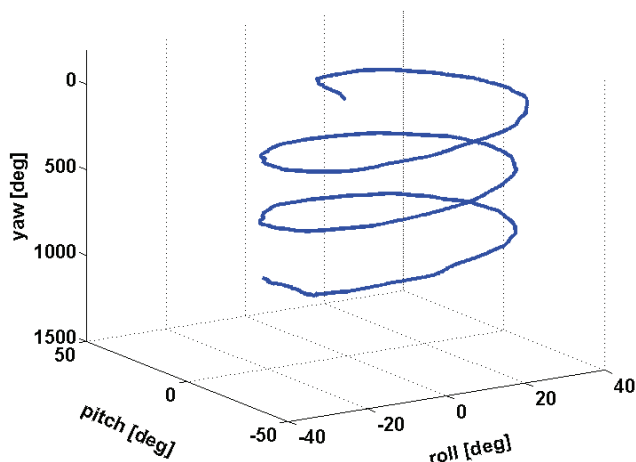
Rys. 7. Rzeczywista trasa przejazdu samochodu [7]

W rzeczywistości trasa przejechana przez samochód, pokazana na rysunku 7, jest o 50 metrów dłuższa niż obliczone przemieszczenie. Dokładność estymacji trajektorii na poziomie 80% może wynikać z faktu, iż podczas testu pojazd poruszał się po drodze brukowanej, co powodowało przenoszenie większych wibracji na sensor. Filtr dolnoprzepustowy nie wyeliminował całkowicie ich wpływu na pomiary. W konsekwencji doprowadziło to do propagacji błędów we wskazaniach akcelerometru, który narastał wraz z upływem czasu. Natomiast dokładnie odwzorowane zostały wszystkie krzywizny drogi.

Test 2 – Jazda po spirali

W celu oceny poprawności estymacji położenia kąтового pojazdu, zdecydowano się na przeprowadzenie testów na trasie o kształcie spiralnym. Otrzymane wskazania miały posłużyć do stwierdzenia czy zastosowany algorytm dostarcza prawidłowych danych o kącie obrotu pojazdu oraz o jego przechyleniu względem poziomu. Uzyskane wyniki wyrażono w funkcji kątów obrotu *roll*, *pitch*, *yaw*, które mówią kolejno o przechyleniu w osi wzdłużnej pojazdu, o nachyleniu, po jakim porusza się pojazd oraz o orientacji kątowej względem kierunku północnego Ziemi.

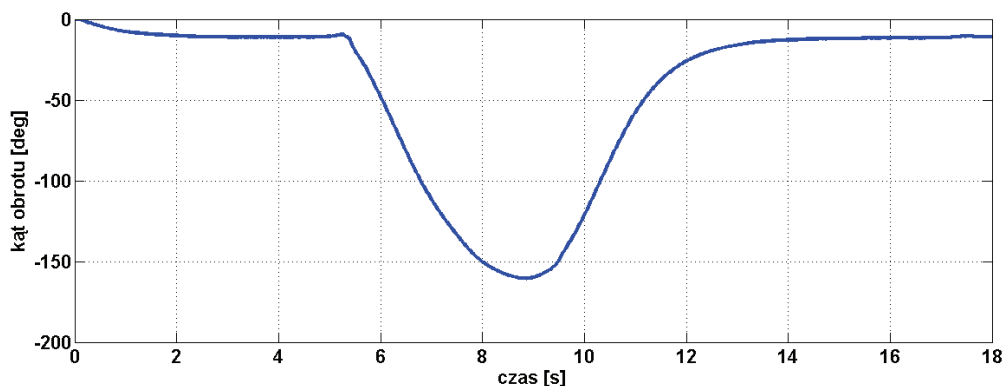
Na podstawie otrzymanego wykresu można zaobserwować, iż trajektoria ruchu została dokładnie odwzorowana. Wyraźnie widoczne są trzy pętle, jakie pokonuje samochód obniżając przy tym swoją pozycję względem Ziemi. Uzyskane informacje o zmianie położenia kąтового samochodu trudno jest odnieść do faktycznych wielkości liczbowych, ponieważ podczas testu nie stosowano dodatkowego urządzenia mierzącego orientację pojazdu w przestrzeni. Brak źródła odniesienia powoduje, iż nie można dokładnie zweryfikować otrzymanych danych. Dokładność pomiarów może być oszacowana jedynie na podstawie znajomości trajektorii ruchu pojazdu, która składała się z trzech pętli, co jest wyraźnie odwzorowane na przedstawionym wykresie.



Rys. 8. Trajektoria pojazdu wyrażona w funkcji kątów obrotu pojazdu

Test 3 – Wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na wskazania magnetometru

Wiedząc, iż magnetometr wykrywa wartość pola magnetycznego Ziemi w badanym punkcie, postanowiono przeprowadzić doświadczenie badające wpływ obecności zewnętrznego pola na wskazania magnetometru. W tym celu wykorzystano telefon komórkowy, który zbliżono do czujnika a następnie oddalono. Czujnik znajdował się w zaparkowanym pojeździe z wyłączonym silnikiem.



Rys. 9. Wpływ zakłóceń pola magnetycznego na wskazania kąta obrotu yaw

Analizując otrzymany wykres stwierdzono, iż wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na pomiary magnetometru jest bardzo duży, co przejawia się zakłamaniami wskazań kąta obrotu pojazdu. Po upływie około dwóch sekund od momentu włączenia sensora, wskazania kąta ulegają stabilizacji, po czym widoczne jest znaczne odchylenie o wartość ponad 150° . Maksymalne odchylenie pojawia się w chwili największego zbliżenia telefonu do czujnika. Wraz z oddaleniem urządzenia, wpływ generowanego

przez nie pola magnetycznego słabnie, zaś wskazania magnetometru wracają do wartości pierwotnej. Przeprowadzone doświadczenie stanowi dowód na wrażliwość czujnika na zewnętrzne pola magnetyczne, co może być kłopotliwe ze względu na dużą liczbę urządzeń elektrycznych wchodzących w skład wyposażenia samochodu, których działanie związane jest z generowaniem silnego pola magnetycznego. Konieczne wydaje się zaprojektowanie odpowiedniej izolacji czujnika minimalizującej błędy wskazań, spowodowane zakłóceniami zewnętrznymi.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone testy pozwoliły na określenie dokładności estymacji przemieszczenia liniowego, oraz położenia kąтового samochodu, na podstawie wskazań badanego sensora. Zaprezentowane wyniki testów świadczą o zadowalającej dokładności systemu. Jedynie w sytuacji, gdy na sensor działało silne zewnętrzne pole magnetyczne, błąd wskazań spowodował 10-krotną różnicę pomiarów w stosunku do wielkości rzeczywistej. Wyciągnięto wniosek, iż wykorzystanie surowych danych z badanego sensora nie zapewnia wystarczającej dokładności pozycjonowania ze względu na duży udział błędów w wynikach pomiaru. Natomiast po zastosowaniu odpowiednich metod filtracji sygnałów z czujników, otrzymane dane wyjściowe stają się wiarygodne i mogą zostać wykorzystane jako źródło informacji na temat aktualnej pozycji pojazdu. W dalszym etapie prac nad usprawnieniem systemu należy skupić się nad doбором miejsca wewnątrz samochodu, które minimalizowałoby wpływ generowanych podczas jazdy wibracji oraz zapewniało stabilne mocowanie sensora nawet przy dużych przeciążeniach działających na pojazd. Jest to kwestia kluczowa, gdyż jak pokazały przeprowadzone doświadczenia, największa trudność wynika z konieczności filtracji zaszumionych sygnałów, które nie nadają się do wykorzystania w postaci nieprzetworzonej. Jednocześnie należy skupić się nad skonstruowaniem obudowy, która wyeliminuje ryzyko uszkodzeń mechanicznych sensora oraz odizoluje czujnik od zewnętrznych pól magnetycznych. Jest to bardzo istotne ze względu na fakt, iż wszystkie podzespoły elektroniczne znajdujące się na powierzchni sensora, nie są w żaden sposób chronione przed możliwymi uderzeniami. Co więcej, izolacja przed polami magnetycznymi zapewni stabilność wskazań magnetometru.

LITERATURA

- [1] *Self-driving Car Logs More Miles*, [online], dostępny pod adresem: <http://googleblog.blogspot.hu/2012/08/the-self-driving-car-logs-more-miles-on.html>, [dostęp 04.2014].
- [2] *Karty techniczne pojazdów biorących udział w zawodach DARPA*, [online], dostępne pod adresem: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/resources.asp>, [dostęp: 09.2013].
- [3] Strona producenta – Sparkfun, [online], dostępna pod adresem: <https://www.sparkfun.com/>, [dostęp 12.2013].

- [4] *Karta katalogowa sensora MinIMU-9 v2 Pololu*, [online], dostępna pod adresem: <http://www.pololu.com/product/1268>, [dostęp: 10.2013].
- [5] *Specyfikacja urządzenia Arduino UNO R3*, [online], dostępna pod adresem: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>, [dostęp: 04.2014].
- [6] KIJAKOWSKI J., *Projekt koncepcyjny systemu komunikacji z otoczeniem w mechatronicznym pojeździe autonomicznym*, praca inżynierska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2013.
- [7] Strona internetowa: https://maps.google.pl/maps?f=d&source=s_d&saddr=Podwale&daddr=Nieznana+droga&hl=pl&geocode=FaXJCwMde_QDAQ%3BFCTXJCwMdZ94DAQ&authuser=0&aq=0&oq=plac+czysty&vps=8&sl=51.103849,17.032231&sspn=0.002896,0.005284&vpsrc=6&t=h&dirflg=w&mra=prev&ie=UTF8, [online], [dostęp: 11.2013].

Piotr KONIECZNY*
Tomasz GODLEWSKI*
Wojciech PAWLAK*

LEKKI ELEKTRYCZNY MOTOCYKL. ANALIZA BUDOWY PROTOTYPU POD KĄTEM MOŻLIWOŚCI HOMOLOGACYJNYCH POJAZDU

W artykule przedstawiono konstrukcję Lekkiego Elektrycznego Motocykla. Ukazano motywacje do stworzenia i zastosowania danych komponentów pod kątem budowy prototypu oraz startu w zawodach. Ponadto dokonano analizy motocykla, jego uwarunkowań i użytych komponentów pod kątem homologacji.

1. MOTYWACJE DO BUDOWY LEKKIEGO ELEKTRYCZNEGO MOTOCYKLA

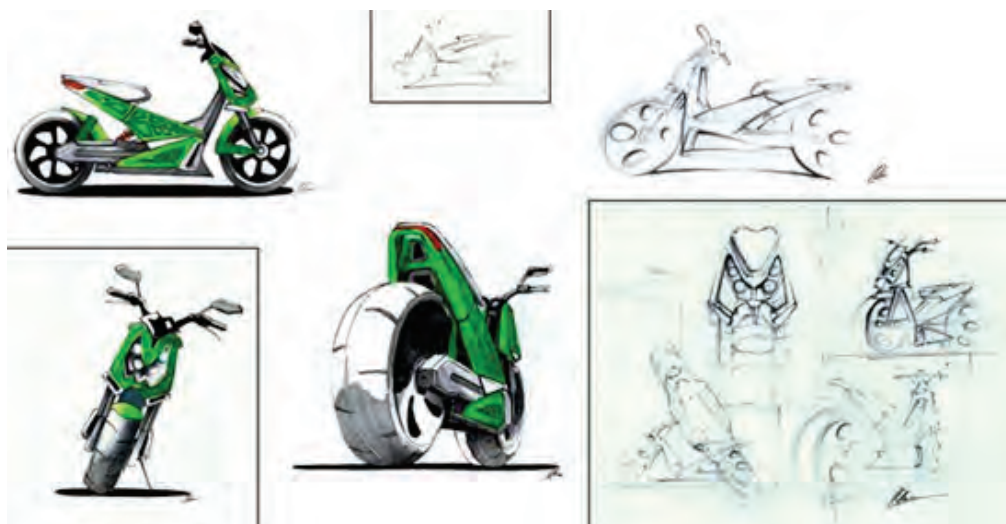
Motocykl, skonstruowany przez studentów Politechniki Wrocławskiej działających w Kole Naukowym Pojazdów i Robotów Mobilnych, został zaprojektowany z myślą o udziale w międzynarodowych zawodach SmartMoto Challenge w Barcelonie. Był to drugi stworzony przez Koło Naukowe prototyp, który wziął udział tych prestiżowych zawodach. W klasyfikacji generalnej zdobył pierwsze miejsce. Rok wcześniej studenci, z projektem motocykla MOS, zostali sklasyfikowani na trzeciej pozycji. Zawody SmartMoto Challenge są wspaniałą okazją dla młodych inżynierów by zaprojektować i skonstruować własny prototyp motocykla. Podczas projektowania nowego pojazdu należy zwrócić szczególną uwagę na uwarunkowania i wymagania stawiane przez regulamin zawodów oraz dyrektywy homologacji pojazdów w kategorii L1E.

2. ANALIZA BUDOWY LEM'A

Motocykl został zaprojektowany tak, by spełniać wymagania regulaminu zawodów oraz kategorii L1E. Kategoria ta zawiera motorowery i pojazdy dwukołowe o maksy-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

malnej prędkości konstrukcyjnej nie większej niż 45 km/h, mające, w przypadku pojazdów napędzanych silnikiem elektrycznym, moc znamionową nie większą niż 4 kW. [1] Ponadto LEM musiał spełniać wymogi w zakresie bezpieczeństwa użytkownika. Obligatoryjnymi komponentami, których wykorzystanie jest wymagane przez regulamin zawodów SmartMoto Challenge, były bateria oraz silnik firmy Elmoto dostarczone przez organizatorów zawodów. Jako odbiorców, którzy w zamyśle mieli być głównymi użytkownikami motocykla, określono studentów, co także istotnie wpłynęło na zastosowane w LEM'ie rozwiązania konstrukcyjne.



Rys. 1. Design Lekkiego Elektrycznego Motocykla

Studenci Koła Naukowego projektując LEM'a brali pod uwagę warunki, którym musiał podołać ich motocykl. Nie tylko te wyznaczone przez organizatorów zawodów, czy wybrane konkurencje, takie jak próba przyspieszenia czy test wodny, ale przede wszystkim warunki codziennego użytku motocykla – warunki ruchu miejskiego. Analizując wszystkie czynniki studenci zaprojektowali lekki, ważący 58 kg motocykl, posiadający bardzo dobre przyspieszenie, przydatne w ruchu miejskim. Takie parametry jak rozstaw osi 1150 mm, kąt ustawienia główki 20°, koła o średnicy 16 cali, pozwoliły otrzymać bardzo dobrą zwrotność motocykla oraz stabilność podczas jazdy przy prędkościach do 45 km/h. Ustalenie położenia kierownicy oraz siedzenia wraz z jego kątem nachylenia odbyło się za pomocą przeprowadzonych przez studentów badań ergonomii [2], [3].

Biorąc pod uwagę wcześniej przytoczone warunki ruchu miejskiego, maksymalną prędkość określoną przez wymagania kategorii L1E na 45 km/h oraz sposób użytkowania motocykla, studenci z KN PiRM postanowili użyć zawieszenia rowerowego o skoku 100 mm włoskiej firmy Marzocchi jako przedniego zawieszenia. Po przeprowadzonych obliczeniach sił występujących podczas hamowania, zdecydowali, iż do konstrukcji ich prototypu zostaną użyte hamulce hydrauliczne firmy Shimano.

Przy projektowaniu szkieletu motocykla – ramy oraz wahacza – przydane okazały się programy CAD, wykorzystane do wizualizacji wizji studentów oraz przeprowadzenia obliczeń MES dla założonych sił występujących podczas jazdy, z uwzględnieniem maksymalnej wagi kierowcy i pasażera określonej na 200 kg. Oba te komponenty zostały wykonane w myśl wpasowania się w koncepcję designu motocykla oraz możliwie najmniejszej ich masy. W związku z czynnikami opisanymi wyżej na materiał ramy wybrano stal C45.

3. HOMOLOGACJA

Homologacja to dokument potwierdzający zgodność produktu z normami i wymogami opisującymi dany produkt. W Unii Europejskiej przewidziane są trzy warianty rejestracji pojazdów:

- Homologacja jednostopniowa – pojazd homologowany jako całość wraz z podzespołami,
- Homologacja krok po kroku – pojazd jako zbiór homologowanych komponentów (ma zastosowanie do produkcji małoseryjnej),
- Dopuszczenie jednorazowe – specjalne dopuszczenie dotyczące jednego egzemplarza [4], [5].

Uzyskanie homologacji w dowolnym kraju Unii Europejskiej umożliwia rejestrację na terenie wszystkich Państw członkowskich. Jednorazowo otrzymana homologacja dotyczy pojazdów, które:

- Należą do jednej kategorii,
- Są produkowane przez tego samego producenta,
- Mają to samo podwozie, ramę lub inną strukturę mocującą główne części składowe,
- Mają źródło napędu działające na tej samej zasadzie (spalanie wewnętrzne, elektryczne, mieszane, itd.),
- Mają takie samo oznaczenie typu nadane przez producenta [4].

Istnieje szereg cech pojazdu, które należy sprawdzić pod kątem zgodności z danymi producenta oraz z wymaganiami określonymi w przepisach dotyczących homologacji, uwzględniając zakres i ostatnie zmiany w każdym z wymienionych przepisów dotyczących homologacji [5]. Poniżej rozpisane są cechy pojazdu oraz komponenty, które należy wziąć pod uwagę podczas sprawdzenia zgodności dla pojazdów dwukołowych – motocykli elektrycznych z kategorii 1LE.

Do pierwszej grupy należą m.in.:

- Obrys ramy,
- Marka i opis silnika,
- Cykl pracy silnika,
- Akumulatory tradycyjne,
- Układ elektryczny (napięcie znamionowe),
- Układ napędowy.

Druga grupa obejmuje m.in.:

- Maksymalny moment obrotowy silnika,
- Maksymalna moc użyteczna silnika,
- Środki zabezpieczające przed zmianą parametrów technicznych,
- Maksymalna prędkość konstrukcyjna, masy i wymiary,
- Środki zabezpieczające przed zanieczyszczeniem powietrza,
- Opony,
- Układ hamulcowy,
- Rozmieszczenie urządzeń oświetleniowych i sygnalizacji świetlnej wraz z tymi urządzeniami,
- Ostrzegawczy sygnał dźwiękowy,
- Miejsce mocowania tylnej tablicy rejestracyjnej,
- Zgodność elektromagnetyczna,
- Poziom hałasu i układ wydechowy,
- Lusterka wsteczne,
- Wystające części zewnętrzne,
- Podpórki, urządzenia zabezpieczające przed użyciem pojazdu przez osoby niepowołane,
- Uchwyt dla pasażera,
- Prędkościomierz [6].

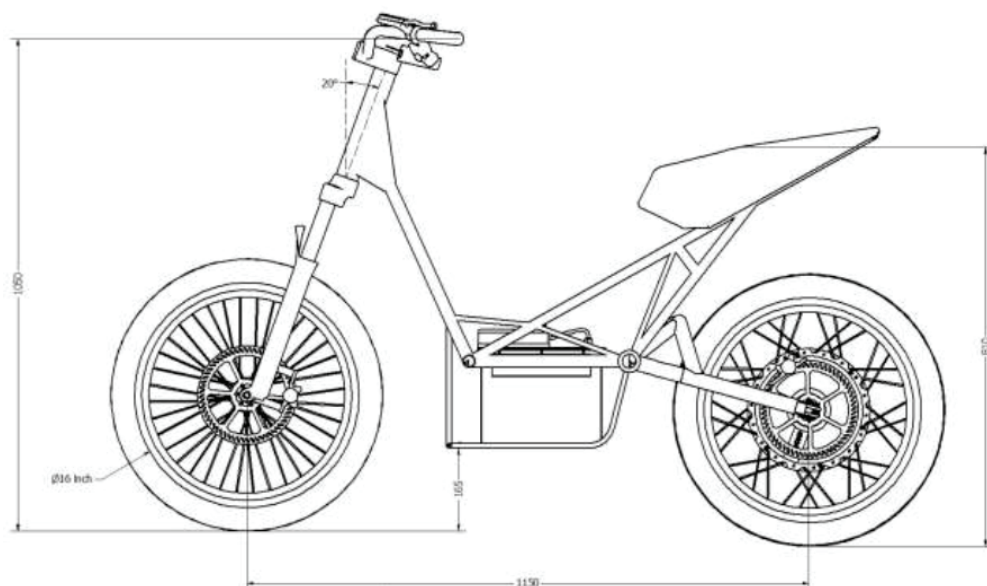
4. ANALIZA BUDOWY LEKKIEGO ELEKTRONICZNEGO MOTOCYKLA POD KĄTEM HOMOLOGACJI

Lekki Elektryczny Motocykl pod kątem homologacji spełnia wiele wymagań. Do jego budowy, zgodnie z wymaganiami zawodów SmartMoto Challenge, został wykorzystany bezszczotkowy silnik firmy Elmoto, umieszczony w piaście tylnego koła, będący układem napędowym. Moc znamionowa silnika to 1,7 kW, zaś maksymalna 2 kW. Moment obrotowy wynosi 55 Nm. Przytoczone parametry silnika gwarantują poprawne sklasyfikowanie motocykla do kategorii L1E. Ponadto są zgodne z normami homologacji.

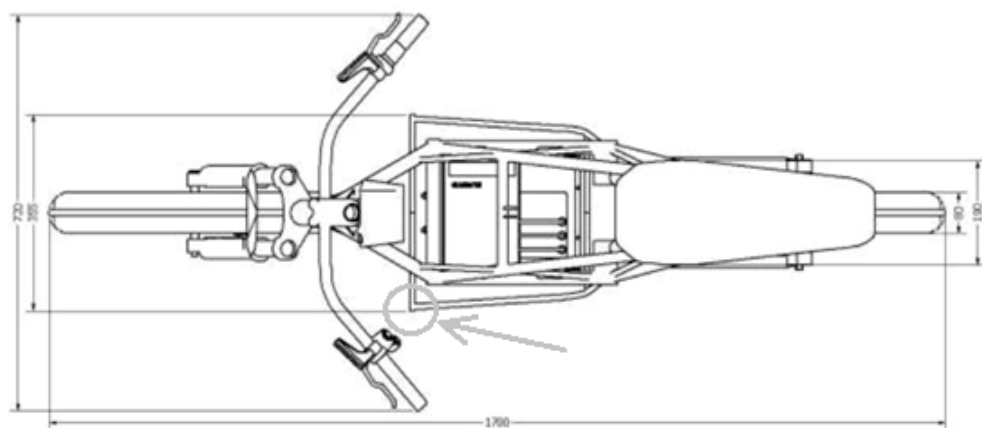
Kolejnym komponentem dostarczonym od organizatorów zawodów jest litowo-jonowy akumulator o pojemności 31,5 Ah, pracujący pod napięciem 48 V.

Jako zabezpieczenie przeciwko zwiększeniu osiągnięć motocykla zainstalowana została blokada elektroniczna, która ustala prędkość maksymalną na poziomie 45 km/h.

Do budowy motocykla, poza wymienionymi wcześniej elementami, studenci Koła Naukowego użyli opon MITAS H07 F/R 80/90-16 48P Reinf. 4,00 TT, zaś jako układ hamulcowy – hydrauliczne hamulce tarczowe. Z przodu zainstalowano ShimanoDeore BR-M675 B o średnicy 203 mm, a z tyłu ShimanoXT RT66 o średnicy 180 mm. Wykorzystano także felgi aluminiowe Simsonao średnicy 16 cali.



Rys. 2. Wymiary główne motocykla wraz z obrysem ramy. Rzut z lewej strony



Rys. 3. Wymiary główne motocykla wraz z obrysem ramy oraz zaznaczonym elementem wystającym podnóżka. Rzut z góry

Lekki Elektryczny Motocykl posiada szereg zabezpieczeń przed niedozwolonym użyciem pojazdu oraz użyciem go w sposób nieprawidłowy. Jednym z nich jest zainstalowana stacyjka, poprzez którą można uruchomić motocykl jedynie przy użyciu kluczyka. Istnienie blokady elektrycznej zapewnia poprawne użytkowanie pojazdu dwukołowego – niemożliwa jest jazda na nim z wyciągniętą nóżką centralną. Ponadto podczas użyciu dowolnego hamulca, zostaje odcięte doprowadzenie zasilania do silnika, dzięki czemu zapewnione jest poprawne, bezpieczne hamowanie.

Kryteria zastosowania środków przeciw zanieczyszczaniu powietrza oraz poziom hałasu i układ wydechowy dwuśladu zostają wyeliminowane z analizy dzięki zastosowaniu elektrycznego napędu. Prototyp skonstruowany przez studentów nie wydaje dźwięku będąc uruchomionym podczas postoju, zaś przy użytkowaniu natężenie dźwięku jest niewielkie. Motocykl także nie wydziela żadnych szkodliwych substancji.

Ostatnimi komponentami, które spełniają kryteria homologacji są: prędkościomierz umieszczony na wyświetlaczu komputera głównego, dźwiękowe urządzenie ostrzegawcze – klakson, zainstalowane podpórki dla stóp kierowcy oraz chowane podpórki pod nogi pasażera. Pomimo zgodności z wieloma punktami kryteriów homologacji Lekki Elektryczny Motocykl w swej budowie posiada kilka elementów niespełniających wymogów do uzyskania homologacji. Wynika to przede wszystkim z konieczności konstruowania motocykla pod kątem udziału w zawodach, które nie zawsze uwzględniają szczegółowe czynniki określone przez dyrektywę dot. homologacji pojazdów. Brak wymaganych elementów blokuje możliwość zarejestrowania pojazdu, a co za tym idzie - użytkowania go na drogach publicznych. W motocyklu użyte zostały komponenty niespełniające wymogów homologacji, często zaprojektowane oraz wykonane przez samych studentów. Jednoślad posiada podwójne światła przednie LED 2×20 Wat, 2 białe listwy LED używane jako światła dzienne, 8 diód LED, które pełnią rolę światła stopu, oraz kierunkowskazy umieszczone z przodu i z tyłu pojazdu. Żadne z powyższych światel nie posiada homologacji i nie spełnia norm określających światła, które mogą być używane w pojeździe dopuszczonym do ruchu [6]. Ponadto w motocyklu niehomologowane jest siedzenie, zaprojektowane i wykonane przez studentów, oraz lusterka wsteczne. Oba te komponenty nie zostały zgłoszone do otrzymania homologacji.

Innym czynnikiem niewziętym pod uwagę podczas konstruowania motocykla jest miejsce położenia oraz zamocowania tablicy rejestracyjnej. Przestrzeń pomiędzy położeniem tylnej płaszczyzny siedziska oraz światła stopu jest zbyt mała i nie spełnia wymogów dyrektywy 93/94/EWG. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku uchwytu ręcznego dla pasażera. Pomimo poprawnego zainstalowania podnóżków, nie wzięto pod uwagę tego aspektu, więc obecnie motocykl nie posiada żadnych uchwytów.

Ostatnimi elementami, które zostały poddane analizie są wystające części zewnętrzne. Na rysunku nr 3 widoczne są wystające elementy mocowania podnóżków do ramy, które dodatkowo tworzą niebezpieczny kąt. Studenci z Koła Naukowego aktualnie podejmują starania dążące do poprawy tego elementu.

5. KIERUNEK DALSZYCH PRAC

Studenci z Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych pragną podjąć się otrzymania homologacji dla swojego jednośladu. W tym celu, oprócz poprawy kilku cech niezgodnych z klasyfikacją, powinni potwierdzić zgodność pewnej części komponentów z danymi producenta. Należy także wymienić urządzenia świetlne oraz zainstalować uchwyty ręczne dla pasażera. Kolejnym kłopotliwym aspektem może oka-

zać się znalezienie z tyłu motocykla odpowiedniej przestrzeni na miejsce zamocowania tablicy rejestracyjnej, tak by nie przeszkadzała w prawidłowej pracy światła tylnego, światła stopu oraz kierunkowskazów. Część komponentów, takich jak siedzenie oraz lusterka wsteczne, powinno oddzielnie zostać poddane homologacji.

Następnym krokiem do otrzymania homologacji jest konieczność przeprowadzenia określonych badań, które często nie tylko potwierdzą zgodność poprawnej pracy działania komponentów oraz ich parametry (np. potwierdzenie maksymalnego i znamionowego momentu obrotowego silnika), ale także potwierdzą poprawną, bezpieczną pracę całego motocykla. Opis tego badania znajduje się w dyrektywie 95/1/WE. Inną analizą jest sprawdzenie kompatybilności elektromagnetycznej. Dzieli się ona na szereg badań, w skład których wchodzi m.in. pomiar emisji szerokopasmowego oraz wąskopasmowego promieniowania elektromagnetycznego pojazdu oraz podzespołów elektrycznych i elektronicznych oraz badanie odporności pojazdu na promieniowanie elektromagnetyczne [7]. Kolejną obowiązkową próbą jest badanie trwałości urządzeń zabezpieczających przed użyciem motocykla przez niewłaściwe osoby. Wymagania odnośnie tego badania przedstawione zostały w dyrektywie 93/33/EWG. Ostatnim, ale bardzo ważnym krokiem jest przeprowadzenie testów hamowania oraz skuteczności układów hamulcowych. Wszelkie czynności, które należy podjąć, opisane zostały w dyrektywie 93/14/EWG [6]. Motocykl przeszedł pomyślnie podobny test hamowania na zawodach SmartMoto Challenge.

6. WNIOSKI ODNOŚNIE BUDOWANIA PROTOTYPU A ASPEKTY HOMOLOGACJI

Najważniejszymi czynnikami wziętymi pod uwagę podczas budowy prototypu były wymogi kategorii L1E, bezpieczeństwa użytkowania, wymagań określonych przez regulamin zawodów SmartMoto Challenge, osiągnięcie jak najlepszych rezultatów podczas wszystkich konkurencji, warunki użytkowania motocykla na drogach w ruchu miejskim oraz próba dotarcia do grupy głównych użytkowników motocykla – studentów. Okazuje się, że podczas budowania prototypu czynnikami mniej istotnymi okazują się te związane z poprawnością względem homologacji. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż pojazd jest prototypem. Nie będzie produkowany seryjnie. Jednakże w następnych latach studenci z Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych planują, podczas projektowania oraz konstruowania swoich prototypów, uwzględnić kryteria dopuszczające pojazdy do otrzymania homologacji.

LITERATURA

- [1] <http://www.stacja.com.pl/prawo/2005/1360/za11.htm>
- [2] GODLEWSKI T., ŻELAZNY Z., PAWLAK W., *Badania ergonomii pasażerów Lekkiego Motocykla Elektrycznego*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2016.

- [3] PAWLAK W., GODLEWSKI T., *Lekki Elektryczny Motocykl – konstrukcja, obciążenia, zawieszenie*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2016.
- [4] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, dnia 20 czerwca 2013 r., poz. 701.
- [5] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, dnia 28 stycznia 2015 r., poz. 148.
- [6] <http://www.abc.com.pl/du-akt/-/akt/dz-u-2005-162-1360>
- [7] http://www.nettax.pl/serwis/imgpub/duuel/2010/116/1_11620100508pl00010052.pdf

*Formula Student, koło jezdne,
kompozyty, badania symulacyjne koła,
metoda propreg*

Szymon KUCHARSKI*
Andrzej BORAWSKI*

PROJEKT LEKKIEJ FELGI DO POJAZDU NA ZAWODY FORMULA STUDENT

Pojazdy budowane na zawody Formula Student wykazywać się muszą zaawansowaną konstrukcją, małą masą oraz dobrymi osiągnięciami. Masa przekłada się bezpośrednio na osiągi auta, więc istotne jest, aby projektowane części były jak najlżejsze. Dlatego też narodził się pomysł wykonania kół jezdnych z lekkich materiałów kompozytowych. W niniejszej pracy przedstawiono założenia, opracowany model oraz wyniki badań symulacyjnych wykonanych różnymi metodami, zgodnie z literaturą. Zaproponowano również technologię wykonania metodą propreg.

1. WSTĘP

Zawody Formula Student, obecnie zrzeszające ponad 500 zespołów akademickich, wywodzą się ze Stanów Zjednoczonych, gdzie w 1979 roku odbyły się pierwsze zawody „Mini-Indy” pod patronatem stowarzyszenia SAE, odpowiedzialnego za większość międzynarodowych norm i uregulowań branży motoryzacyjnej. Obecnie zawody Formuły Student odbywają się w ośmiu krajach, wszystkie obwarowane są tymi samymi przepisami. Podczas zawodów oceniane są m.in. rozwiązania techniczne przyszłych inżynierów, oraz osiągi zbudowanych przez nich pojazdów. Oceny dokonują konstruktorzy branży motoryzacyjnej, oraz sędziowie (m.in. Formuły 1). Cerber Motorsport to zespół budujący aktualnie trzeci bolid na tego typu zawody. Zaprojektowana felga ma zostać wykorzystana w czwartym aucie.

Każdy podzespół pojazdu jest istotny, ale niektóre mają dużo większy wpływ na bezpieczeństwo niż inne. Niektóre elementy, nawet w wyniku uszkodzenia, nie spowodują fatalnych w skutkach wypadków. Inne, w przypadku popsucia, mogą w jednej chwili doprowadzić do katastrofy. Przykładem takiego elementu jest koło

* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

jezdne, składające się z felgi i opony. Felgi są jednym z najbardziej odpowiedzialnych elementów w samochodzie. Prawidłowo zaprojektowana felga powinna być lekka, wytrzymała i atrakcyjnie wyglądająca.

Felgi samochodowe na przestrzeni lat bardzo się zmieniały. W pierwszych pojazdach z silnikami spalinowymi używano felg drewnianych (rys. 1). Zostały one wyparte przez felgi stalowe, a te z kolei, coraz częściej zastępowane są aluminiowymi. Dziś do produkcji felg stosowane są różne materiały. Najnowszym trendem są felgi z włókna węglowego (rys. 2).



Rys. 1. Felga drewniana [8]



Rys. 2. Felga z włókna węglowego do samochodu Koenigsegg One [9]

Felgi pojazdów sportowych muszą spełniać wyjątkowo restrykcyjne wymagania, ponieważ przy minimalnej masie muszą charakteryzować się maksymalną możliwą wytrzymałością. Stąd na przestrzeni ostatnich lat rozpoczęto prace nad optymalizacją kształtu felg aluminiowych poprzez usuwanie materiału w miejscach mało obciążonych. Następnie zaczęto eksperymentować z wykorzystaniem innych materiałów do budowy felg. Dzisiaj, dzięki rozwinięciu technologii wykonywania oraz większej dostępności, przemysł motoryzacyjny zaczął produkować felgi z włókna węglowego. W samochodzie Koenigsegg One, dzięki wykorzystaniu włókna węglowego zmniejszono masę każdej felgi o około 4 kg. Masa 16 kg w samochodzie, który waży ponad tonę, wydaje się być mało znacząca, jednak jest to masa wirująca, która w przypadku działania sił dynamicznych ma ogromny wpływ na jakość prowadzenia pojazdu i jego parametry. Felga ta, mimo tak niskiej masy, odznacza się ogromną wytrzymałością na uderzenia (większą niż wcześniejsza aluminiowa). Pozwala także rozpędzić się do prędkości ponad 400km/h. Niezwykle istotna jest tu technologia wykonania, która zostanie szczegółowo opisana w dalszej części pracy.

2. WPŁYW MAS WIRUJĄCYCH NA SIŁĘ NAPĘDOWĄ POJAZDU SPORTOWEGO

Jak wynika z drugiej zasady dynamiki Newtona, przy zadanej sile napędowej pojazdu redukcja masy powoduje zwiększenie przyspieszenia. Siłę napędową pojazdu opisać można równaniem E. Habicha:

$$P_n = \frac{M i_c \eta_m}{r_d} - \frac{1}{r_d r_t} (I_s i_c^2 \eta_m + \sum I_p i_p^2 \eta_p + \sum I_{kn}) \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

Zaznaczony składnik równania (1) to suma momentów bezwładności kół napędzanych. Znając równanie na masowy moment bezwładności:

$$I = mr^2 \quad (2)$$

można zauważyć, że mniejsza masa koła ma bezpośredni wpływ na wzrost siły napędowej.

W fazie przyspieszania pojazdu silnik zwiększa swoją prędkość obrotową. To samo tyczy się wszystkich mas wirujących w pojeździe, poczynając od skrzyni biegów, poprzez wał napędowy, dyferencjał, półosie napędowe, a kończąc na kołach z oponami. Moment obrotowy, generowany przez silnik, musi więc przewyższyć momenty bezwładności wielu elementów. W przypadku niskich prędkości obrotowych, energia pochłaniana na pokonanie momentów bezwładności koła (opony, felga, hamulce) sięga 6%. Wkład procentowy wydaje się być niewielki, jednak w przypadku samochodów sportowych, biorąc pod uwagę czasy na okrążeń różniące się o kilka tysięcznych sekundy, każdy procent ma znaczenie. W przypadku bolidów Formuły Student, przy mocy około 50 KM i bardzo niskiej masie własnej, tracenie każdego konia mechanicznego z silnika skutkuje dużo gorszymi czasami przejazdów.

Felgi należą do masy nieresorowanej w pojeździe. Amortyzatory pojazdu muszą więc kontrolować tę masę w przypadku nierówności. Im masa nieresorowana mniejsza – tym pojazd prowadzi się lepiej [4].

3. BADANIA SYMULACYJNE FELGI

Do badań symulacyjnych wykorzystano model felgi, w którą wyposażony był bolid CMS-02 zbudowany przez zespół Cerber Motorsport. Jest to felga firmy Braid 10", wykonana w całości ze stopów aluminium. Pierwszym krokiem badań było opracowanie modelu 3D środowisku SolidWorks.



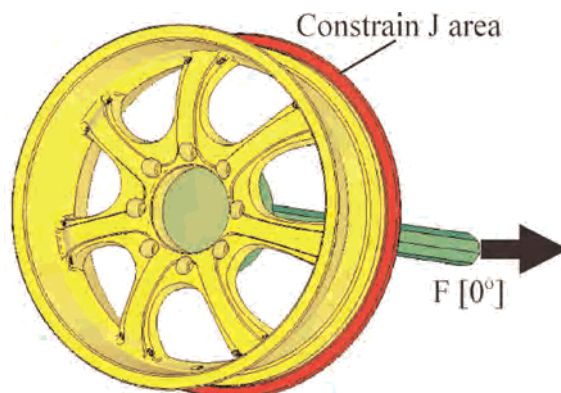
Rys. 3. Opracowany model CAD felgi

Analizę wytrzymałościową wykonano na tym modelu felgi dlatego, że jest ona fizycznie na wyposażeniu koła Auto-Moto-Club. Dzięki temu możliwa będzie weryfikacja wyników otrzymanych w badaniach symulacyjnych. Weryfikacja umożliwi dobór warunków brzegowych symulacji najbardziej zbliżonych do rzeczywistego stanu obciążeń felgi.

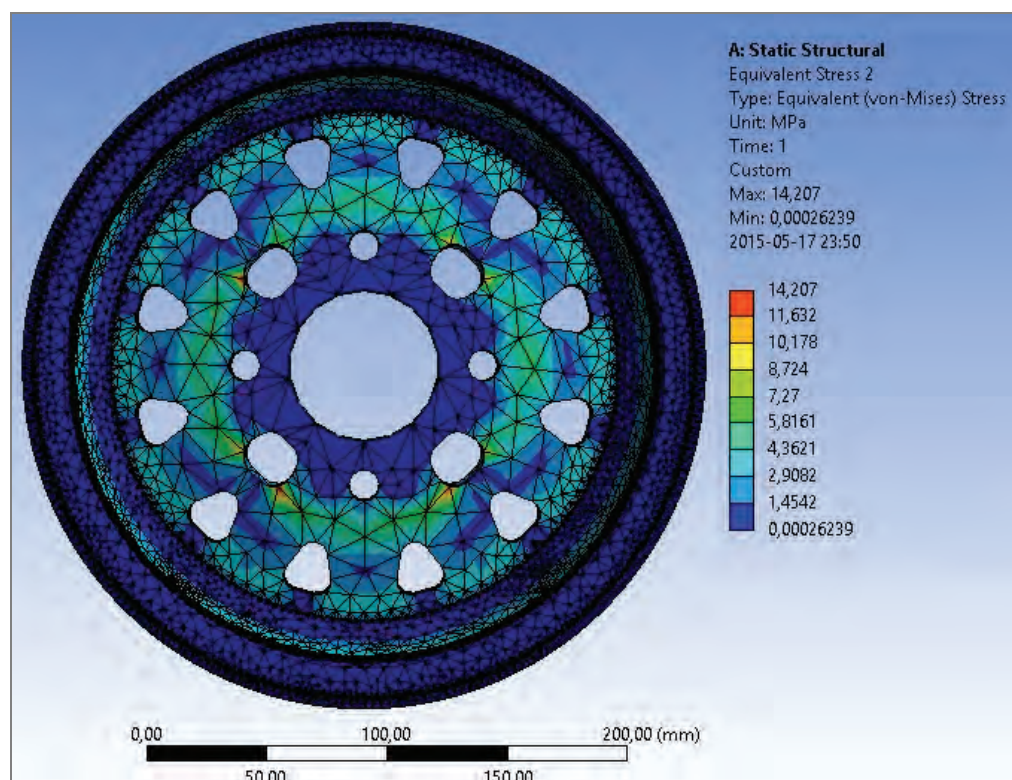
Do badań wytrzymałościowych, wykonanych metodą elementów skończonych, wykorzystano trzy różne metody zadawania warunków brzegowych, opisane w poszczególnych pozycjach literaturowych. W symulacji przyjęto, że felga wykonana jest ze stopu aluminium 7075-T6 (SN). Analizę stanu obciążeń wykonano wykorzystując metodę elementów skończonych (MES) [3, 7] w środowisku Ansys i SolidWorks.

3.1. METODA WANG'A

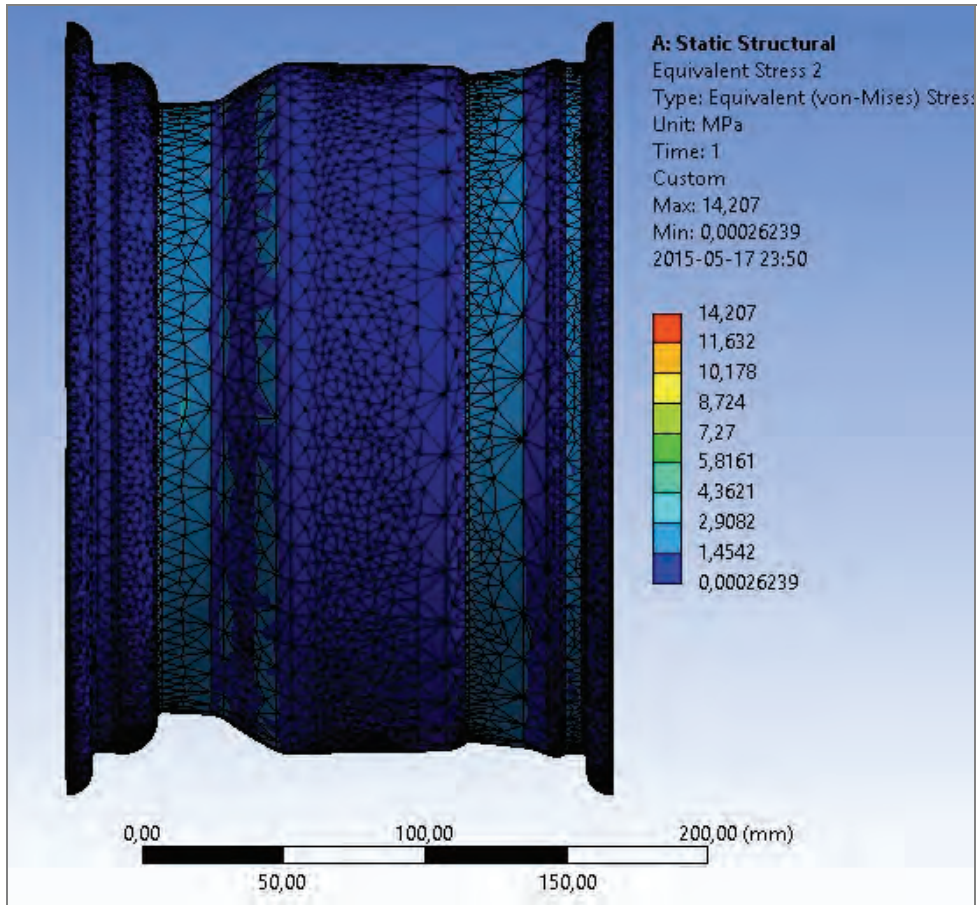
Wang w swoich badaniach [1] obciążał fege na jej obręczy, a dokładnie w miejscu styku opony z obręczą (rysunek 4). Miejscami mocowania (geometrią nieruchomą) ustanowione zostały otwory montażowe felgi na piaście. Obciążając fege według powyższego schematu siłą F , obliczoną zgodnie z zaleceniami literatury [1], otrzymano wykres rozkładu naprężeń w feldze (rysunki 5 i 6). Symulację wykonano w środowisku Ansys. Jak można zauważyć, miejscami najbardziej obciążonymi są krawędzie ramion felgi. Naprężenia sięgają tam wartości 14,2 MPa. Mając na uwadze granicę plastyczności materiału można stwierdzić, że nie są to naprężenia duże. Tak mała wartość pozwala przypuszczać, że metoda nie daje najlepszych wyników. Pamiętać jednak należy, że w symulacji nie uwzględniono obciążeń dynamicznych, które w znaczący sposób wpływają na naprężenia w feldze [4].



Rys. 4. Sposób obciążania i umocowania felgi w badaniach symulacyjnych [1]



Rys. 5. Wykres naprężeń powstałych w feldzie na skutek obciążenia metodą Wanga (widok czoła felgi)

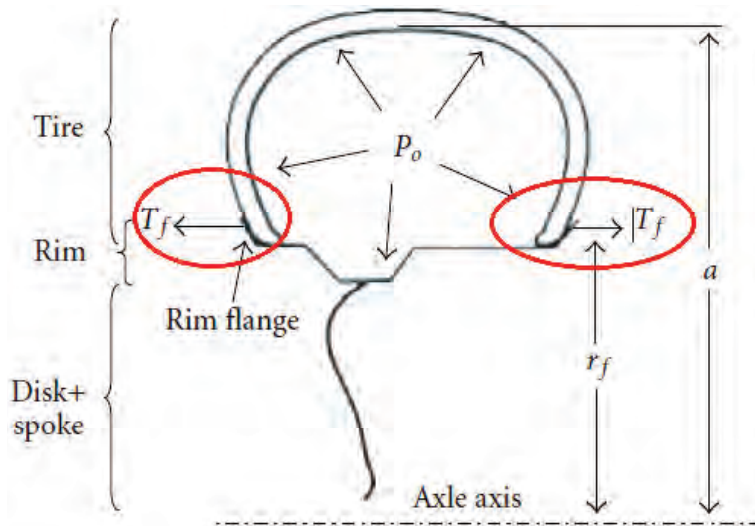


Rys. 6. Wykres naprężeń powstałych w feldzie na skutek obciążenia metodą Wanga (widok boku felgi)

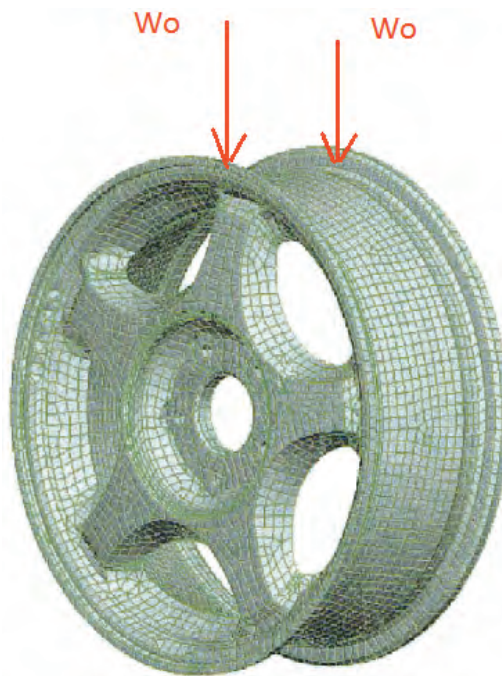
3.2. METODA STEARNSA

Zgodnie z zaleceniami autora [2] przyjęto odpowiednią wartość siły T_f , działającej na ścianki obrzeża felgi w miejscu, gdzie opona styka się obręczą felgi, oraz ciśnienie W_o działające na obręcz felgi (rysunki 7 i 8).

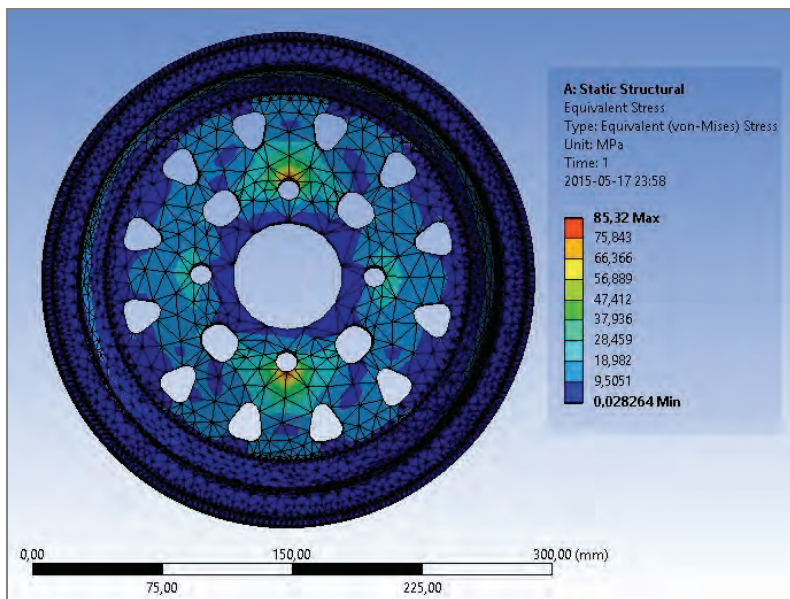
Symulację wykonano w środowisku Ansys. Otrzymane wyniki (rysunek 9 i 10) są bardziej wiarygodne w stosunku do tych, uzyskanych w rozdziale 3.1, a maksymalne naprężenia w nich otrzymane (85,32 MPa) występują w okolicach otworów na śruby, co jest faktycznym miejscem koncentracji naprężeń w felgach.



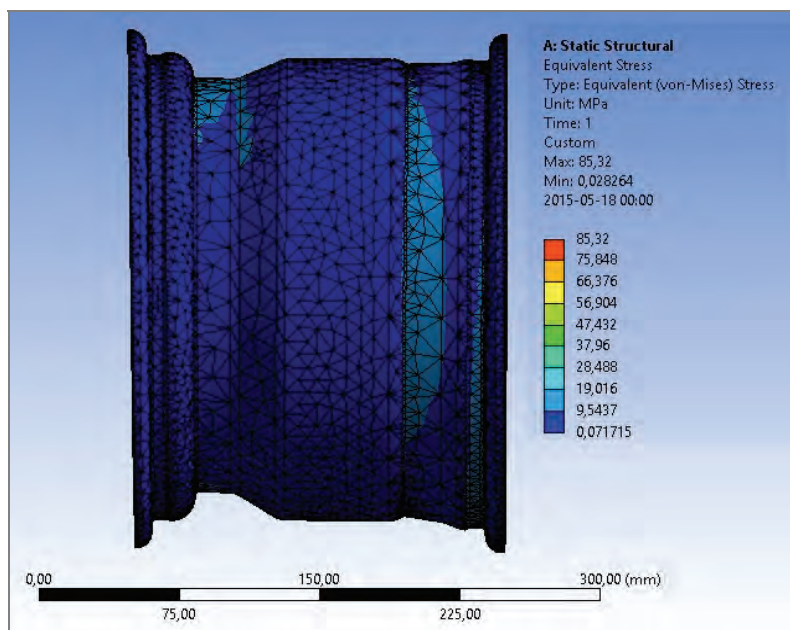
Rys. 7. Schemat obciążenia felgi [2]



Rys. 8. Schemat obciążenia felgi [2]



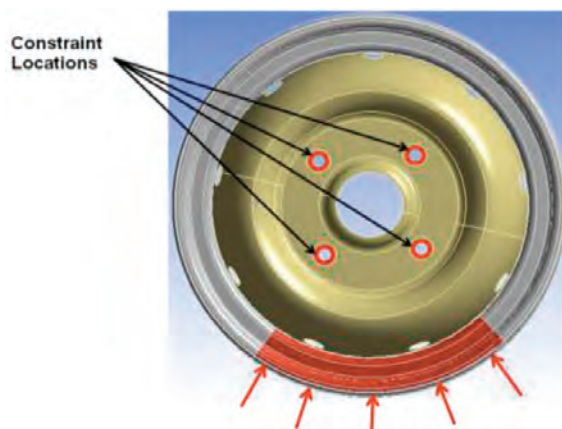
Rys. 9. Wykres naprężeń powstałych w feldze na skutek obciążenia metodą Stearnsa i innych (widok czola felgi)



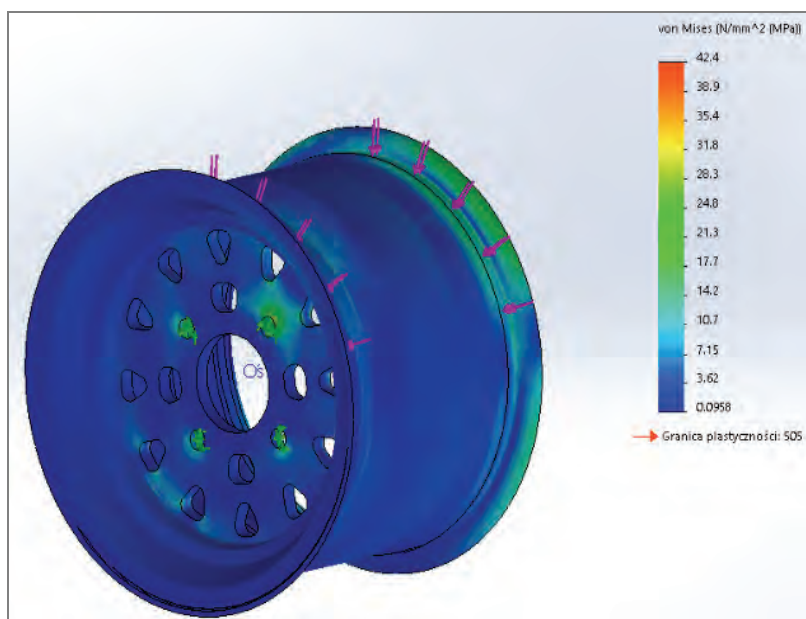
Rys. 10. Wykres naprężeń powstałych w feldze na skutek obciążenia metodą Stearnsa i innych (widok boku felgi)

3.3. METODA YADAV I RAMDASI

Tę metodę wykorzystano w symulacji opracowanej w programie SolidWorks. Tym razem również przyjęto siłę wyliczoną zgodnie z zaleceniem autora [5], przyłożoną po obu stronach felgi w miejscu styku stopki opony z felgi, na powierzchni o rozłożystości 80° (rysunek 11).



Rys. 11. Schemat obciążenia oraz umocowania felgi metodą Yadav i Ramdasi [5]



Rys. 12. Wyniki badań symulacyjnych wykonanych metodą Yadav i Ramdasi w środowisku SolidWorks

Wyniki otrzymane metodą Yadav i Ramdasi przedstawiono na rysunku 12. Jak można zauważyć, największe naprężenia w tym badaniu wyniosły około 42 MPa. Skumulowały się one w okolicach otworów na śruby mocujące do piasty. W przekonaniu autorów, uzyskane tą metodą wyniki są wiarygodne.

Kolejnym, planowanym etapem prac, związanych z projektem felgi, jest weryfikacja wyników badań symulacyjnych. Pozwoli ona na wybór najlepszej metody symulacji. Następnie wykonane zostaną modele CAD felg wykonanych z włókna węglowego. Wykorzystując proces optymalizacji, oraz wybraną metodę symulacji, zaprojektowany zostanie kształt felgi oraz proces produkcji [6].

4. TECHNOLOGIA WYKONYWANIA FELG Z WŁÓKNA WĘGLOWEGO

Elementy z włókna węglowego znalazły szerokie zastosowanie w sportowych pojazdach, głównie ze względu na dobry stosunek masy do wytrzymałości. Dzięki tym właściwościom włókno węglowe od dawna wykorzystywane jest do produkcji bolidów F1 oraz pojazdów startujących w innych sportach ekstremalnych. Elementy z włókna węglowego można wykonywać na kilka sposobów. Jednym z nich jest laminowanie ręcznie lub metoda infuzji. W przemyśle motoryzacyjnym najszerzym zastosowaniem cieszy się metoda prepreg, ze względu na to, że elementy powstające tą metodą cechują się największą wytrzymałością.

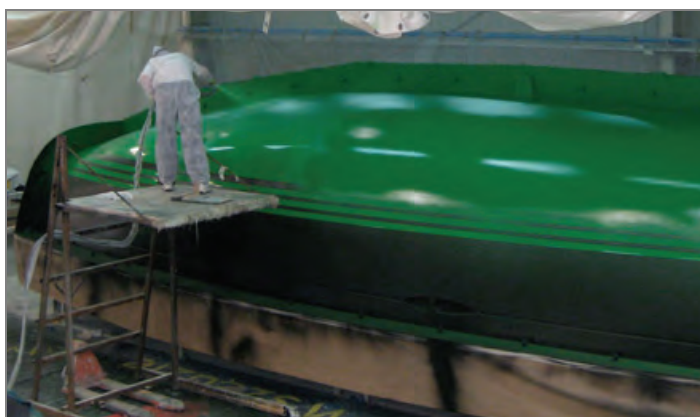
4.1. METODA PREPREG

W metodzie tej, w pierwszej kolejności wykonywany jest model negatywowy felgi. Jest to negatywowe odbicie kształtu, który chcemy finalnie uzyskać. Od dokładności i jakości wykonania tego etapu zależy finalna jakość wyrobu. Technologia wykonania formy negatywowej w tej pracy zostanie pominięta.



Rys. 13. Forma negatywowa wnętrza felgi [10]

Na formę negatywową w pierwszej kolejności nakładane jest kilka warstw wosku w celu łatwego oddzielenia gotowego produktu. Kolejnym krokiem jest nałożenie żelkotu, będącego połączeniem żywicy poliestrowej z odpowiednimi wypełniaczami oraz pigmentami. Stanowi on późniejszą zewnętrzną powłokę kompozytu, nadaje jej dodatkową ochronę przed czynnikami zewnętrznymi oraz estetyczny wygląd. Do produkcji felgi bolidu CMS-03 planowane jest wykorzystanie żelkotów na bazie żywic winyloestrowych. Taki wybór żelkotu, oraz specjalna konstrukcja formy daje produkt o wysokiej odporności na działanie wysokich temperatur, doskonałej odporności na styren i bardzo wysokich parametrach wytrzymałościowych. Wysoki połysk powierzchni form, nawet po wielu odformowaniach, jest zapewniony dzięki odpowiedniej twardości i chemoodporności. Żelkot będzie nakładany ręcznie ze względu na wymagania co do dokładności tego zabiegu.

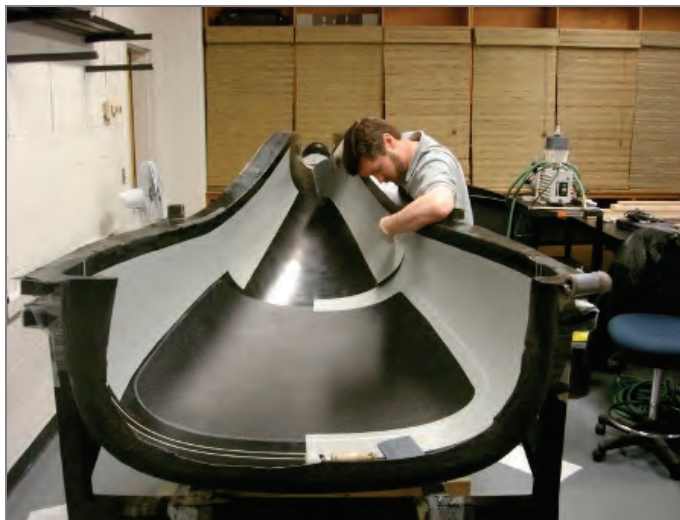


Rys. 14. Natryskiwanie żelkotu [10]

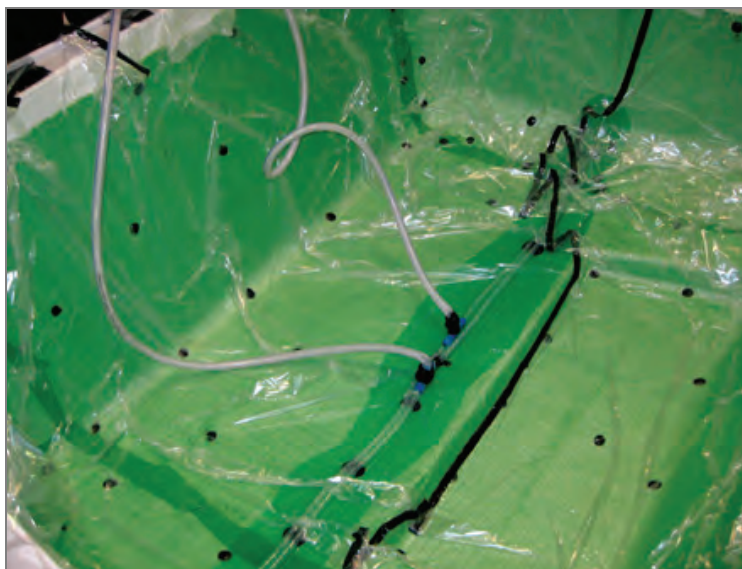
Najważniejszym etapem jest ten, w którym rozpoczynany jest proces laminowania. Prepreg to tkanina/roving UD nasączona żywicą. Spotyka się dwa rodzaje – całkowicie lub jednostronnie przesączone. Tkaniny jednostronne z jednej strony wyglądają jak suchy normalny materiał, a z drugiej rozłożona jest równomierna warstwa żywicy. Każdy prepreg posiada swoją specyfikację, w której podawana jest np. zawartość żywicy, kierunek ułożenia włókien oraz ich grubość. Po rozmrożeniu (prepregi przechowywane są w niskich temperaturach) wycina się potrzebne kształty wg szablonów (np. przy użyciu ostrego nożyka czy skalpela chirurgicznego). Nakładanie na formę przypomina naklejanie naklejek, można bardzo dokładnie rozmieścić materiał bez ryzyka jego przesunięcia. W miejscu gdzie będą znajdowały się otwory na mocowanie śrub wycina się krążki o średnicy np. 25 mm. Następnie nakleja się kolejne warstwy tkaniny. Ten etap jest najważniejszy, ponieważ kąt ułożenia kolejnych warstw oraz dokładność wykonania w szczególnie narażonych w feldze miejscach (miejsca na śruby, ramiona, bark obręczy) ma decydujący wpływ na finalną wytrzymałość mechaniczną felgi oraz jej nośność. Po naklejeniu wszystkich

warstw (tzn. zewnętrznej jako pierwszej i dalej zbrojenia, pasów wzmacniających), rozpocząć należy kolejny etap wytwarzania.

Po ułożeniu zbrojenia nakłada się na nie tkaninę delaminacyjną oraz matę odsączającą. Delaminaż służy do łatwego oddzielenia wyrobu od pozostałych elementów natomiast mata odsączająca w kolejnych etapach wchłonie nadmiar żywicy (rysunek 15).



Rys. 15. Układanie kolejnych warstw kompozytu wraz z odpowiednimi przekładkami [11]



Rys. 16. Laminowanie wspomaganie próżnią [10]



Rys. 17. Gotowy element wykonany technologią prepreg [8]

Następnie całość wkładana jest do worka próżniowego. Podciśnienie daje możliwość wytworzenia docisku, który równoważy naprężenia włókien zbrojenia i powoduje lepsze przyleganie kolejnych warstw włókien do siebie. Gdy żywica ma jeszcze niską lepkość, (temperatura pokojowa nie aktywuje jej) istnieje możliwość odebrania nadmiarów nie-usieciowanej żywicy (która znajduje się pomiędzy warstwami zbrojenia i stwarza zagrożenie rozwarstwienia się gotowego laminatu). Usunięcie nadmiarów żywicy prowadzi do uzyskania lepszego stosunku zawartości zbrojenia do ilości żywicy, co w konsekwencji obniża masę elementu. W przypadku felgi jest to bardzo istotne.

Ostatnim etapem jest włożenie elementu wraz z workiem do autoklawu na okres około 6 godzin. Jest to piec umożliwiający jednocześnie grzanie i wywieranie ciśnienia na materiał. Zalecana temperatura, to w zależności od konstrukcji, 90–145 °C. Podciśnienie i zwielokrotnione nadciśnienie konsolidują warstwy prepregu oraz wyciskają nadmiary żywicy z pomiędzy warstw włókien, a podwyższona temperatura powoduje utwardzenie laminatu.

5. PODSUMOWANIE

Podczas badań symulacyjnych zauważono, że zależnie od przyjętego modelu zadawania warunków brzegowych otrzymane wyniki mogą zdecydowanie się różnić. Pierwszy przypadek (roz. 3.1) w dalszych rozważaniach nie będzie brany pod uwagę ze względu na jego mało prawdopodobne wyniki. Pozostałe przypadki zostaną zweryfikowane badaniami empirycznymi. Planowane dalsze badania symulacyjne uwzględnią będą zmianę materiału (ze stopu aluminium na włókno węglowe) oraz kształtu felgi, zgodnie z wynikami procesu optymalizacji.

Model felgi z włókna węglowego będzie wyglądał zupełnie inaczej. Planowane jest zastosowanie nowatorskiego rozwiązania kształtu ramion tarczy felgi, oraz zgłoszenie patentowe. Projektowana felga będzie wykorzystana w czwartej generacji bolidu zespołu Cerber Motorsport – CMS-04.

Projekt jest na etapie wstępnym. Kolejnymi etapami, które zostaną wykonane są:

1. Wykonanie badań empirycznych, których obiektem będzie felga aluminiowa, w celu weryfikacji metod zadawania obciążeń w badaniach symulacyjnych.
2. Zoptymalizowane kształtu felgi.
3. Wykonanie modelu felgi z włókna węglowego.
4. Wyznaczenie odpowiedniej ilości warstw włókien węglowych, które przy ułożeniu ich pod odpowiednim kątem, przeniosą zbadane obciążenia w wyżej wymienionych miejscach felgi.
5. Wykonanie badań wytrzymałościowych na prototypie felgi z włókna węglowego.

LITERATURA

- [1] WANG L., CHEN Y., WANG C., WANG Q., *Fatigue Life Analysis of Aluminum Wheels by Simulation of Rotary Fatigue Test*, Journal of Mechanical Engineering, 2011, Vol. 57, No. 1, 31–39.
- [2] STEARNS J.C., *An Investigation of Stress and Displacement Distribution in A Aluminum Alloy Automobile Rim*, A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Akron, 2000.
- [3] VENKATESWARA RAO K., DHARMARAJU T., *Analysis of Wheel Rim Using Finite Element Method*, International Journal of Engineering Research and Technology, 2014, Vol. 3(1), 1259–1263.
- [4] SABRI M., REZAL M., MU'AZ A., SHAHRIL K., IHSAN J., *Deformation Behaviour Analysis of Car Wheel Rim under Different Loading Using Finite Element Method*, International Journal of Engineering and Technology, 2015, Vol. 5, No. 3, 181–184.
- [5] YADAV P.H., RAMDASI P.G., *Optimization of Car Rim Using OptiStruct*, IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology, 2012, Vol. 2(3), 10–15.
- [6] RAVI KUMAR P.V., SATYA MEHER R., *Topology Optimization of Aluminium Alloy Wheel*, International Journal of Modern Engineering Research, 2013, Vol. 3(3), 1548–1553.
- [7] CURRIE A., WILSON B., *Finite Element Analysis of an Automotive Wheel – A Case History*, National Conference Publication, Institution of Engineers, Australia, 1981, 16–20.
- [8] www.sprzedajemy.pl (20.04.2015)
- [9] www.hotdigitalnews.com (02.05.2015)
- [10] www.konstrukcjeinzynierskie.pl (29.04.2015)
- [11] www.baltazarkompozyty.pl (10.05.2015)

*konstrukcje dla pojazdów przyszłości, motoryzacja,
SmartMoto Challenge, skuter, siły, mechanika,
dynamika motocykla*

Marcin KURZAŁ*
Wojciech PAWLAK*
Tomasz GODLEWSKI*

OBCIĄŻENIA STATYCZNE ORAZ DYNAMICZNE, JAKIM PODDAWANA JEST RAMA SKUTERA ELEKTRYCZNEGO

Skuter a fizyka – obciążenia, którym musi stawić czoło jednośląd każdego dnia. Referat opisuje rozkład ciężaru poszczególnych części skutera oraz sposoby wyznaczenia środka ciężkości wraz z pasażerami. Przedstawia rozkład sił na poszczególnych kołach w stanie spoczynku. Następnie przedstawione są obciążenia działające na każdą oś w skrajnych warunkach ruchu dynamicznego: podczas maksymalnego przyspieszania oraz hamowania. Na koniec obliczone są obciążenia działające na jednośląd podczas skręcania.

1. WSTĘP

Skuterami codziennie przemieszczają się miliony osób. Ze względu na swoje małe gabaryty, zwrotność i ekonomiczność, są idealnym środkiem transportu do pokonywania niewielkich odległości. W mieście bez problemu przeciskają się między autami. Zmieszczą się w każdym zakręcie i w każdej uliczce. Trudno o tańszy i bardziej ekonomiczny pojazd z silnikiem. Wydaje się, że są mniejszymi, prostszymi kuzynami motocykli. Motocykle i skutery muszą spełniać szereg wymagań, zapewniających bezpieczeństwo kierowcy. Studenci z Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych z Politechniki Wrocławskiej dostali właśnie takie zadanie. Zaprojektować i skonstruować skuter elektryczny, który dzięki swojej niskiej wadze i napędzie elektrycznym będzie w stanie stać się tanim i uniwersalnym środkiem lokomocji. Pomysł powstał na potrzebę udziału w zawodach SmartMoto Challenge odbywających się już po raz drugi w Barcelonie. W zeszłorocznej edycji wrocławscy studenci zdołali zakończyć rywalizację na 3. miejscu podium. W tym roku mają nadzieję na więcej.

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2.OBCIĄŻENIA STATYCZNE

Masa samego skutera nie jest szczególnie duża, mniejsza od masy kierowcy, a tym bardziej od kierowcy z pasażerem. W obliczeniach uwzględniono przypadek jazdy z maksymalną dopuszczalną masą całkowitą. Masę skutera określono w okolicach 60 kg, dodatkowo przyjęto wagę osób i towarów na nim przewożonych równą 140 kg. Zatem dopuszczalna masa całkowita została określona na 200 kg. Całkowity ciężar F_g możemy wyliczyć:

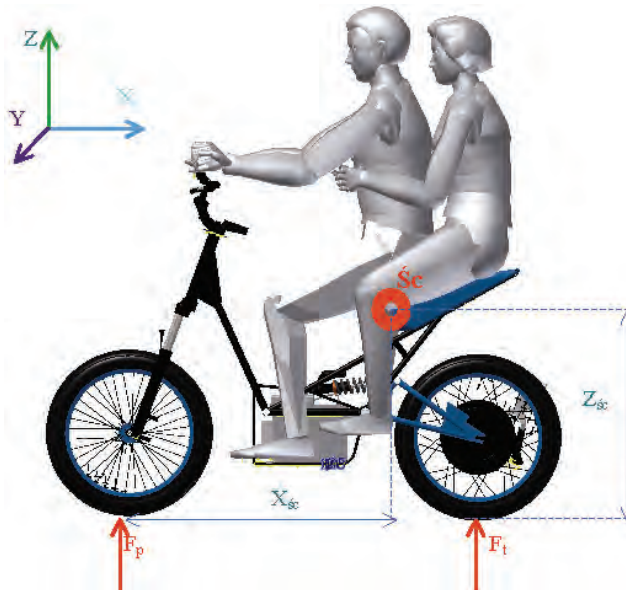
$$F_g = m * g = 200\text{kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1962\text{N} \quad (1)$$

gdzie:

- F_g – siła ciężkości,
- m – masa pojazdu,
- g – przyspieszenie ziemskie.

2.1. ŚRODEK CIĘŻKOŚCI

Ciężar skutera rozkłada się na dwie powierzchnie – miejsca kontaktu opon z podłożem. Aby obliczyć poszczególne składowe, należy określić położenie środka ciężkości (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład sił reakcji: F_p – siła reakcji działająca na przednie koło, F_t – siła reakcji działająca na tylne koło, \dot{S}_c – środek ciężkości

Przyjmuje się, że motocykl jest symetryczny względem płaszczyzny XZ, więc składowe oblicza się wzdłuż osi X (oś w kierunku jazdy) i Z (oś prostopadła do podłoża), pomijając oś Y (oś prostopadła do kierunku jazdy). Istnieje kilka sposobów na wyznaczenie położenia środka ciężkości:

1) Metoda analityczna

Cały pojazd dzieli się na części składowe. Należy wyznaczyć masę każdej części oraz jej środek ciężkości. Dla torusów (koła), rur (części ramy) i innych przedmiotów o regularnych, prostych kształtach nie stanowi to problemu. Nie posiadając fizycznie tych części, wystarcza informacja o objętości, gęstości oraz wzór:

$$m = \rho * V \quad (2)$$

gdzie:

m – masa pojazdu,

ρ – gęstość,

V – objętość.

Klamki kierownicy, siedzisko oraz bateria stanowią większe wyzwanie, lecz niewielkie pomyłki przy ich danych nie będą miały dużego znaczenia dla wyników. Największy problem stanowią kierowca i pasażer, gdyż nie tylko ich budowa, lecz również pozycja siedzenia, wpływają na położenie środka ciężkości. W tej sytuacji korzysta się z literaturowych danych antropometrycznych [1].

Składową poziomą i pionową oblicza się w ten sam sposób:

wybiera się punkt odniesienia, względem którego będziemy liczyć, a następnie korzysta ze wzorów:

$$X_{\dot{sc}} = \frac{m_1 * X_1 + m_2 * X_2 + \dots + m_n * X_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (3)$$

$$Z_{\dot{sc}} = \frac{m_1 * Z_1 + m_2 * Z_2 + \dots + m_n * Z_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (4)$$

$m_1, m_2, [\dots] m_n$ – masy kolejnych elementów,

$X_1, X_2, [\dots] X_n$ – składowe poziome położenia środka ciężkości kolejnych elementów,

$Z_1, Z_2, [\dots] Z_n$ – składowe poziome położenia środka ciężkości kolejnych elementów,

$X_{\dot{sc}}$ – składowa pozioma położenia środka ciężkości całego pojazdu,

$Z_{\dot{sc}}$ – składowa pozioma położenia środka ciężkości całego pojazdu.

W celu uproszczenia, należy przyjąć środek symetrii jednego z kół jako punkt odniesienia. Metoda ta jest używana w obliczeniach początkowych, gdy jednośląd jest dopiero projektowany i istnieje potrzeba podania pewnych danych, aby móc kontynuować prace.

2) Metoda z użyciem istniejącego skutera

Ta metoda jest używana, gdy posiada się kompletny jednośląd. Jest ona dużo prostsza i dokładniejsza. Problemem jest potrzeba posiadania gotowego pojazdu. Do obliczenia składowej poziomej wystarczą 2 wagi. Ustawiamy na nich skuter (wraz z kierowcą i pasażerem), odczytuje się wskazania, a następnie liczy stosunki:

$$\%_p = \frac{m_p}{m_t + m_p} \quad (5)$$

$$\%_t = \frac{m_t}{m_t + m_p} \quad (6)$$

$\%_p$ – procentowe obciążenie przedniego koła,

$\%_t$ – procentowe obciążenie tylnego koła,

m_p – wskazanie wagi przy przednim kole,

m_t – wskazanie wagi przy tylnym kole.

Przyjmując jako punkt odniesienia środek ciężkości jednego z kół oraz znając rozstaw osi (R_o), można łatwo policzyć składową poziomą (tu: punkt początkowy układu współrzędnych w osi przedniego koła):

$$X_{\acute{s}c} = R_o * \%_t \quad (7)$$

Policzenie składowej pionowej jest bardziej skomplikowane. Należy jeden z końców podnieść o znany kąt i ponownie odczytać wskazania wagi, a następnie skorzystać ze wzoru:

$$Z_{\acute{s}c} = \frac{R_o * (m_{t1} - m_{t2})}{(m_{t1} + m_{p1}) * \text{tg}(\varphi)} + r_{\acute{s}r} \quad (8)$$

m_{t1} – wskazania wagi przy tylnym kole w pierwszym położeniu pojazdu (prosto, na poziomym podłożu),

m_{t2} – wskazania wagi przy tylnym kole po podniesieniu końca pojazdu,

m_{p1} – wskazania wagi przy przednim kole w pierwszym położeniu pojazdu (prosto, na poziomym podłożu),

$r_{\acute{s}r}$ – średni promień kół,

φ – kąt odchylenia skutera z pozycji wyjściowej.

3) Metoda z wykorzystaniem programów typu CAD

Metoda najdokładniejsza i najszybsza. Wymaga posiadania zamodelowanego pojazdu. Wiele programów komputerowego wspomaganie projektowania posiada funkcję liczenia położenia środka ciężkości. Przykładem może być CATIA i jej funkcja

„Measure inertia”. Błędy mogą wynikać tylko z wad modelu albo jego właściwości (rodzaj nadanych materiałów).

Znając położenie środka ciężkości, można obliczyć rozkład obciążeń statycznych (dla nich wystarczy składowa pozioma). Punkt zerowy przyjmujemy w osi przedniego koła.

$$\%_t = \frac{X_{\dot{sc}}}{R_o} \quad (9)$$

$$\%_p = \frac{R_o - X_{\dot{sc}}}{R_o} \quad (10)$$

Następnie można obliczyć rozkład obciążeń statycznych

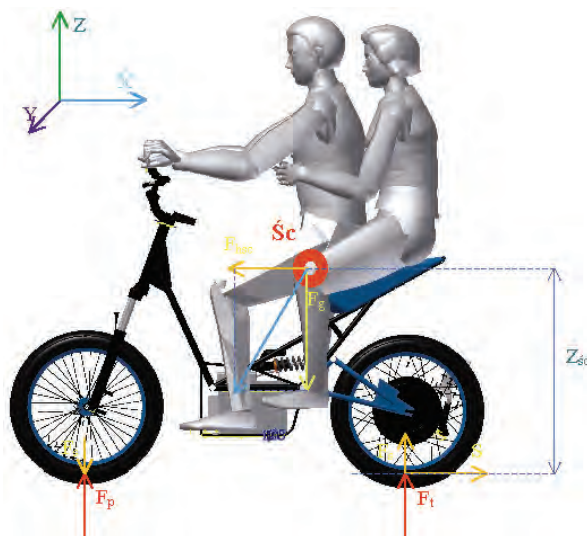
$$F_p = \%_p * (m_p + m_t) * g \quad (11)$$

$$F_t = \%_t * (m_p + m_t) * g \quad (12)$$

W tym momencie, znane są siły jakie działają bezpośrednio na przednie i tylne koło.

2.2. PRZYSPIESZANIE

Aby pojazd uzyskał określoną prędkość, musi zostać rozpędzony. Niezależnie od tego czy przyspiesza szybko, czy wolno, w wyniku działania sił bezwładności koło tylne jest dociążane, natomiast przednie odciążane. Większość dostępnych na rynku



Rys. 2. Rozkład sił z uwzględnieniem sił hamowania oraz tarcia

jednoślądów posiada napęd na tył, skuter studentów Politechniki Wrocławskiej również. Posiada on silnik zamontowany bezpośrednio w kole, przez co unika się utraty mocy na przekładniach. Zatem podczas przyspieszania jest do dyspozycji całkowita moc, którą generuje silnik.

Do obliczeń wytrzymałościowych potrzebne są skrajne wartości obciążeń. Z tego powodu używa się granicznych parametrów silnika. Aby uzyskać dokładne wartości sił działających na każde z kół, zaczyna się od obliczenia wartości siły przyspieszającej S [3].

$$S = \frac{M_s}{r_t} \quad (13)$$

M_s – maksymalny moment obrotowy silnika,

r_t – promień tylnego koła.

Następnie oblicza się składową tej siły, do- i odciążającą koła.

$$F_s = \frac{S * R_o}{Z_{\acute{s}c}} \quad (14)$$

Wartość tej siły jest taka sama dla przedniego i tylnego koła, natomiast zwroty wektorów są przeciwne. Zatem:

$$F_{sp} = F_p - F_s \quad (15)$$

$$F_{st} = F_t + F_s \quad (16)$$

2.3. HAMOWANIE

W związku z tym hamowanie zależy od różnych czynników, m.in. stanu układu hamulcowego, opon i warunków nawierzchni. Wartość siły hamowania można obliczyć za pomocą wzoru:

$$F_h = F_N * \mu = m * g * \mu \quad (17)$$

F_h – siła hamowania

F_N – siła normalna

μ – współczynnik tarcia

Więc zależy ono od sił normalnych oraz współczynnika tarcia. Maksymalna wartość współczynnika tarcia wynosi ok. 0,7 dla jednoślądów poruszających się po ulicach. Wartość do 1,2 osiągają tylko wyścigowe motocykle na specjalnych oponach, jednak ten skuter się do nich nie zalicza. Bowiem porusza się w zakresie, który

łatwo przekroczyć i zablokować koła. Ma to niekorzystny wpływ na hamowanie. Przy zablokowanych kołach maleje współczynnik tarcia, co (zgodnie z powyższym wzorem) zmniejsza siłę hamowania. W obliczeniach wytrzymałościowych przyjmuje się warunki ekstremalne, dlatego używa się maksymalnej wartości współczynnika tarcia.

Obliczenia należy zacząć od wyznaczenia statycznej siły hamowania:

$$F_{hsp} = \mu * F_p \quad (18)$$

$$F_{hst} = \mu * F_t \quad (19)$$

$$F_{hsc} = F_{hsp} + F_{hst} \quad (20)$$

F_{hst} – statyczna siła hamowania działająca na tylne koło,

F_{hsp} – statyczna siła hamowania działająca na przednie koło,

F_{hsc} – całkowita statyczna siła hamowania działająca na pojazd.

Następnie oblicza się dynamiczną siłę hamowania dla każdego koła:

$$F_{hp} = F_p * \mu + F_{hsc} * \frac{Y_{sc}}{R_o} \quad (21)$$

$$F_{ht} = F_t * \mu - F_{hsc} * \frac{Y_{sc}}{R_o} \quad (22)$$

F_{hp} – dynamiczna siła hamowania działająca na tylne koło,

F_{ht} – dynamiczna siła hamowania działająca na przednie koło.

Również bardzo ważne jest, by linia poprowadzona przez wektor siły wypadkowej, widoczna na rysunku 2, przecinała podłoże przed punktem styku przedniego koła z podłożem. W przeciwnym wypadku może dojść do przewrotu w przód.

2.4. JAZDA W ZAKRĘCIE

Nasza droga podczas jazdy nigdy nie jest linią prostą. Skręca się często przy różnych prędkościach. Podczas każdego zakrętu działa na pojazd siła odśrodkowa, obliczana ze wzoru:

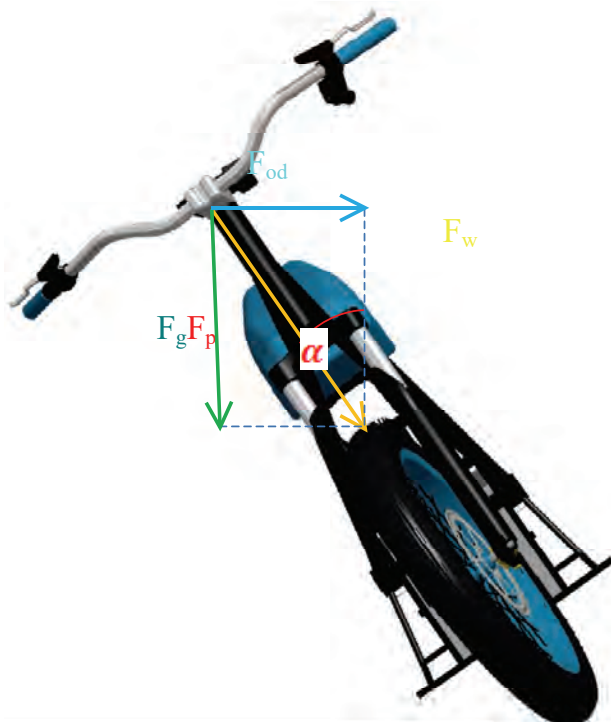
$$F_{od} = \frac{m * v^2}{r} \quad (23)$$

F_{od} – siła odśrodkowa,

$m = m_p + m_t$ – całkowita masa pojazdu,

r – promień skrętu,
 v – prędkość liniowa pojazdu.

Masa oraz prędkość są dane (przyjmowana jest maksymalna prędkość, z którą pojazd może się poruszać). Pozostaje kwestia promienia skrętu. Potrzebna jest jego minimalna wartość, aby wyznaczyć maksymalną wartość siły.



Rys. 3. Siła odśrodkowa działająca na skuter;
 F_w – siła wypadkowa podczas skręcania

Siła odśrodkowa działa w osi Y , natomiast siły normalne w osi Z . Przecinają się pod kątem 90° i są ze sobą powiązane zależnością

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_{od}}{F_p + F_t} = \frac{v^2}{r * g} \quad (24)$$

Z niej można wyznaczyć r :

$$r = \frac{v^2}{\operatorname{tg} \alpha * g} \quad (25)$$

Zatem minimalny promień skrętu uzyskuje się przy maksymalnym kącie pochyle-
nia (α). Teoretycznie możliwe jest pochylenie się na skuterze do kąta , zachowując
równowagę ($\text{tg}\alpha = \mu = 1$). W projekcie studenci KN PiRM przyjęli wartość tego kąta
równą, posilując się tabelami zamieszczonymi w literaturze [2]. Mając wartość siły
odśrodkowej i kąta α , możliwe jest policzenie wypadkowej siły (F_{sm}), działającej
w punkcie środka ciężkości, według wzoru:

$$F_{sm} = \frac{F_{od}}{\sin\alpha} \quad (26)$$

Proporcje składowych obciążeń kół nie zmieniają się, więc:

$$F_{smp} = F_{sm} * \%_p \quad (27)$$

$$F_{smt} = F_{sm} * \%_t \quad (28)$$

F_{smp} – obciążenie przedniego koła podczas skręcania,

F_{smt} – obciążenie tylnego koła podczas skręcania.

Podczas skręcania człowiek wyczuwa siłę odśrodkową. Jest poddawany przeciąże-
niu. Większość użytkowników odczuwa je jako coś przyjemnego, podnoszącego po-
ziom radości z jazdy oraz adrenalinę. Jego wartość jest bezwymiarowa. Jest stosun-
kiem przyspieszenia odśrodkowego do przyspieszenia ziemskiego. Wyznaczany ze
wzoru:

$$\frac{a}{g} = \frac{v^2}{r * g} \quad (29)$$

3. WNIOSKI

Skuter, jak każdy pojazd, codziennie jest wystawiony na działania sił, o których
zwykły użytkownik nie myśli. Skuter musi sprostać każdej sytuacji, dlatego brane
pod uwagę są warunki ekstremalne. Maksymalne przyspieszanie, hamowanie z pełną
siłą. Nie są to rzadkie sytuacje na ulicach, a decydują o ludzkim życiu. Żaden ele-
ment ramy, ani spoina, nie mogą ulec zniszczeniu. Zawieszenie musi amortyzować
nierówności, zapewniając przy tym komfort pasażerowi. Przedstawione powyżej
równania i obliczenia pozwalają określić podstawowe siły działające na motocykl.
Są niezbędne do prawidłowego projektowania pojazdu oraz umożliwiają określe-
nie warunków brzegowych dla koniecznych analiz podczas konstruowania moto-
cykla.

LITERATURA

- [1] TRZESNIEWSKI M., *Rennwagentchnik*, Vieweg + Teubner, 2008.
- [2] FOALE T., *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and the science*, Hiszpania, 2002.
- [3] COSSALTER V., *Motorcycle Dynamics*, Lulu.com, 2006.

*skuter elektryczny, rama,
metoda elementów skończonych,
analizy wytrzymałościowe, skuter przyszłości*

Jakub MICAŁ*
Marcin ŁYP*

PROJEKT RAMY DLA LEKKIEGO MOTOCYKLA ELEKTRYCZNEGO LEM NAPOLI

Artykuł zawiera opis ramy skutera na zawody SmartMoto Challenge. Mając na uwadze wymogi zawodów, skuter a więc i rama zostały przystosowane do transportu żywności. Podczas projektowania ramy niezbędne było jej dostosowanie do wymogów stawianych pojazdom tego typu oraz do regulaminu konkursu. Artykuł przedstawia przede wszystkim problemy konstrukcyjne przy projektowaniu ramy, omawia warunki brzegowe oraz wyjaśnia powiązania między koncepcją początkową a projektem końcowym.

1. WSTĘP

Skuter został zaprojektowany przez Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych z myślą o starcie w zawodach SmartMoto Challenge które odbędą się w lipcu 2015 r. w Barcelonie. W poprzedniej edycji zespół z Politechniki Wrocławskiej zwyciężył w zawodach. W tym roku chce potwierdzić swoją wiedzę oraz umiejętności i ponownie zdobyć tytuł.

Podczas projektowaniu skutera elektrycznego kierowaliśmy się innowacyjnością. Postawiono na rozwiązania i design, którego nie spotyka się na co dzień w pojazdach tego typu. Założeniem było zbudowanie ekologicznego pojazdu złożonego ze stosunkowo tanich ekologicznych komponentów. Priorytetem były również niskie koszty eksploatacji i konkurencyjność na rynku przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymagań konkursowych.

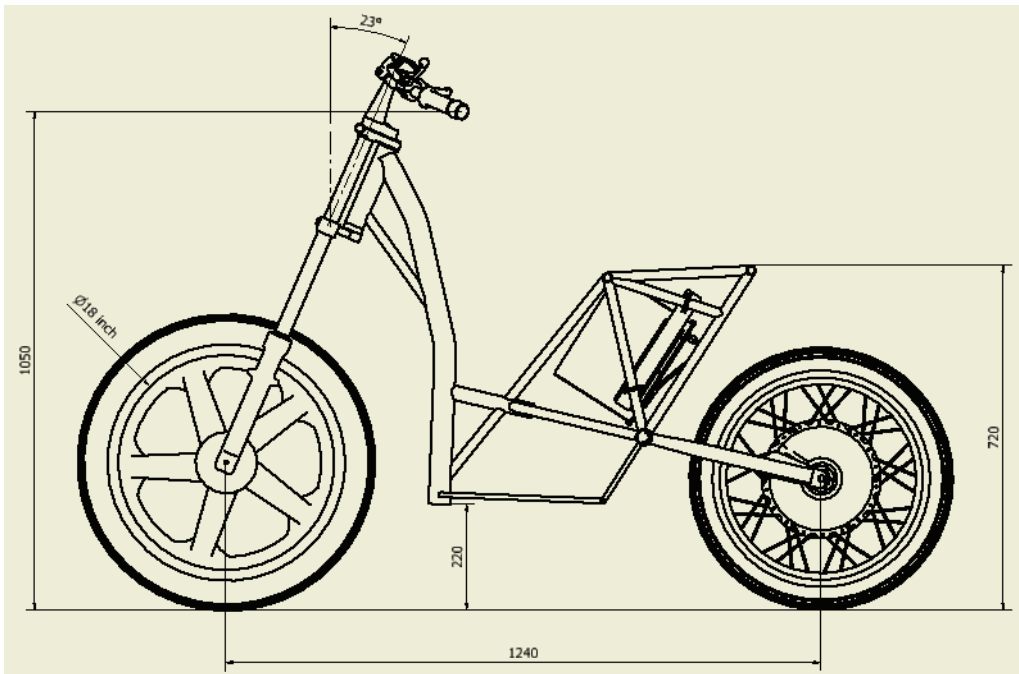
* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2. WARUNKI BRZEGOWE

Warunki brzegowe zostały określone poprzez ułożenie tablic morfologiczny na początku projektu. Mając na uwadze system przyznawania punktów na zawodach oraz doświadczenia wyniesione z poprzedniego projektu zespół zdecydował, że kluczowymi parametrami będą: przyspieszenie i redukcja masy pojazdu.

Kierując się redukcją masy pojazdu konstruktorzy postanowili połączyć główkę ramy z szkieletem skutera za pomocą jednej rury. Rozwiązanie takie nie jest popularne w pojazdach tego typu, gdzie dominują dwa okrągłe profile łączące główkę ramy ze szkieletem. Przysporzyło to wiele problemów przy obliczeniach wytrzymałościowych, mimo to była to opcja najbardziej zbliżona do designu założonego na początku projektu, zwiększyło walory estetyczne, ale negatywnie wpłynęło na rozkład masy.

Z racji przeznaczenia skutera do przewozu żywności założono jego wzmoczoną eksploatację. Biorąc pod uwagę ograniczenia technologiczne baterii i jej niewystarczającą pojemność, zespół postanowił dostosować konstrukcję ramy do częstego i łatwego jej wymieniania. Wymusiło to pozostawienie więcej przestrzeni na baterię oraz mechanizm umożliwiający jej swobodne usunięcie. Rozwiązanie to ujemnie wpłynęło na położenie środka ciężkości.



Rys. 1. Przyjęte warunki brzegowe

Podczas projektowania należało zwrócić uwagę na dodatkowe naprężenia w miejscu mocowania siedziska spowodowanych modułami dołączanymi do skutera: dodatkowe siedzisko dla pasażera oraz pojemnik na pizzę. Oba te elementy z zakładanym maksymalnym obciążeniem posiadają znaczną masę, którą trzeba uwzględnić podczas obliczeń wytrzymałościowych. Korzystając z doświadczeń wyciągniętych z poprzedniego projektu założono ten sam rozstaw kół oraz ich rozmiar. W celu zwiększenia stabilności skutera zwiększono kąt główki ramy. Konsekwencją takiego rozwiązania jest zmniejszenie zwrotności, która jednak podczas normalnej eksploatacji skutera pozostała na wystarczającym poziomie. Zwiększeniu uległa odległość podnóżków pojazdu od podłoża. W poprzednim projekcie okazała się niewystarczająca i przy dużym pochyłe skutera powodowała kolizje z podłożem. Przyjęte warunki brzegowe zostały przedstawione na rys. 1.

3. OBLICZANIE SIŁ

Znając położenie środka ciężkości skutera i zakładając jego masę można bardzo łatwo policzyć siły wpływające na ramę. Bierzemy pod uwagę siły hamowania, siły przy skręcie i ciężar ramy. Zakładamy tutaj prędkość maksymalną równą 45 km/h, ponieważ jest to wymóg narzucony przez organizatora. Tabele 1, 2 oraz 3 prezentują siły powstałe w ramie dla różnych przypadków obciążeń.

- Moment obrotowy silnika: $T_w = 50$ [Nm],
- Promień przedniego koła: $R_{f_w} = 0,31$ [m],
- Promień tylnego koła: $R_{r_w} = 0,28$ [m],
- Rozstaw osi kół: $p = 1,24$ [m],
- Masa: $m = 200$ [kg],
- Wysokość środka ciężkości: $h = 0,83$ [m],
- Położenie środka ciężkości względem osi tylnego koła: $x = 0,3$ [m],
- Współczynnik tarcia statyczny: $\mu_s = 0,7$,
- Współczynnik tarcia dynamiczny: $\mu_d = 1$.

Tabela 1. Siły przy maksymalnym przyspieszeniu

| | |
|---------------------------------------|--------|
| Siła napędowa | 160 N |
| Siła bezwładności działająca w pionie | 109 N |
| Obciążenie dynamiczne przedniego koła | 336 N |
| Obciążenie dynamiczne tylnego koła | 1556 N |

Tabela 2. Obciążenie statyczne kół

| | |
|---------------------------|--------|
| Obciążenie na przednią oś | 475 N |
| Obciążenie na tylną oś | 1487 N |

Tabela 3. Obciążenia dynamiczne podczas hamowania

| | |
|--|-------------------------|
| Współczynnik tarcia: | (przypadek ekstremalny) |
| Statyczna siła hamowania na przód | 475 N |
| Statyczna siła hamowania na tylną oś | 1962 N |
| Dynamiczna siła hamowania na tylnym kole | 169 N |
| Dynamiczna siła hamowania na przednim kole | 1793 N |

3.1. SIŁY PODCZAS SKRĘCANIA

Siła odśrodkowa przy maksymalnym pochyleniu 45° i minimalnym promieniu skrętu 40,5 m

$$F_{cf} = \frac{mv^2}{r} = \frac{200 * 16,67^2}{40,5} = 1373,4 \text{ [N]}$$

4. OPIS MATERIAŁU RAMY

Zespół za sprawy priorytetowe postawił ograniczenie masy ramy. Najprościej można to osiągnąć poprzez redukcję ilości materiału. Dzięki temu można zwiększyć zasięg, prędkość maksymalną i przyspieszenie. Przez wzgląd na przeznaczenie skutera oraz wstępny projekt ramy zespół nie zdecydował się na zastosowanie materiału innego niż stal. Spowodowałoby to podniesienie ceny motocykla tym samym zmniejszenie jego konkurencyjności przy potencjalnej sprzedaży. Rama została zaprojektowana i optymalizowana przy pomocy metody elementów skończonych (MES). Tabela 4 prezentuje skład chemiczny oraz podstawowe parametry wytrzymałościowe materiału na ramę.

Tabela 4. Opis materiału

| Skład chemiczny | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|----------|----------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| C [%] | Mn [%] | Si [%] | P [%] | S [%] | Cr [%] | Ni [%] | Mo [%] | Al [%] | Cu [%] |
| 0,42–0,5 | 0,5–0,8 | 0,1–0,4 | max 0,04 | max 0,04 | max 0,3 | max 0,3 | max 0,1 | max 0,5 | max 0,3 |
| Właściwości wytrzymałościowe | | | | | | | | | |
| Granica wytrzymałości na rozciąganie: Rm | | | | | Granica plastyczności: Re | | | | |
| 650–800 MPa | | | | | 430 a | | | | |

Przez wzgląd na współczynnik bezpieczeństwa $k = 1,3$ przy projektowaniu tej konstrukcji zakładamy, że naprężenia powinny być mniejsze niż 330 MPa i maksymalne odchylenie nie powinno przekraczać 10 mm.

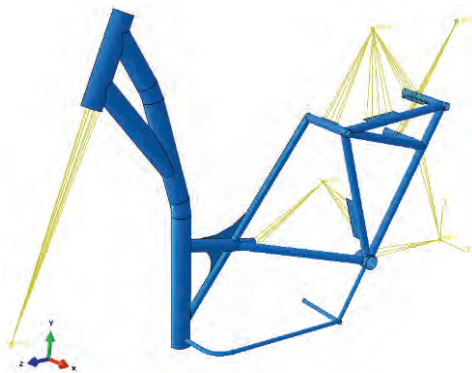
5. OPIS SIATKI I WIĄZAŃ ZASTOSOWANYCH DO ANALIZY RAMY

Rysunek 2 przedstawia siatkę modelu. Siatka składa się z 46 280 czworokątnych i trójkątnych elementów. Elementy trójkątne stanowią poniżej 3% całej siatki. Podczas obliczeń korzystano z symetrii modelu.

Model został związany w sposób pozwalający ramie na zginanie. (odblokowanie rotacji w osi X i przemieszczenia w osi Y). Rysunki 3 i 4 przedstawiają sposoby związania ramy dla różnych rodzajów analiz. Przód i tył zostały powiązane z miejscami mocowania elementów zawieszenia. Kierowca pasażer i elementy motocykla zostały związane z odpowiednimi elementami ramy.

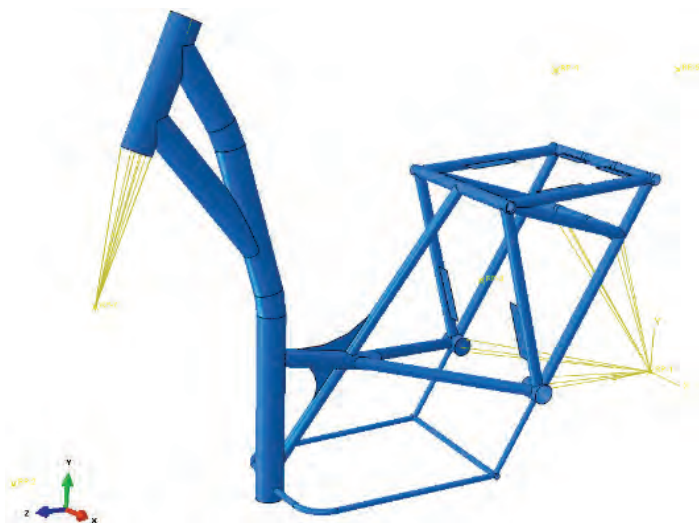


Rys. 2. Mesh Ramy



Rys. 3. Sposób związania ramy

Podczas analizy sztywności wzdłużnej i skrętnej tylnej osi zostały odebrane wszystkie stopnie swobody.



Rys. 4. Sposób związania ramy podczas analizy sztywności wzdłużnej i skrętnej

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW ANALIZY MES

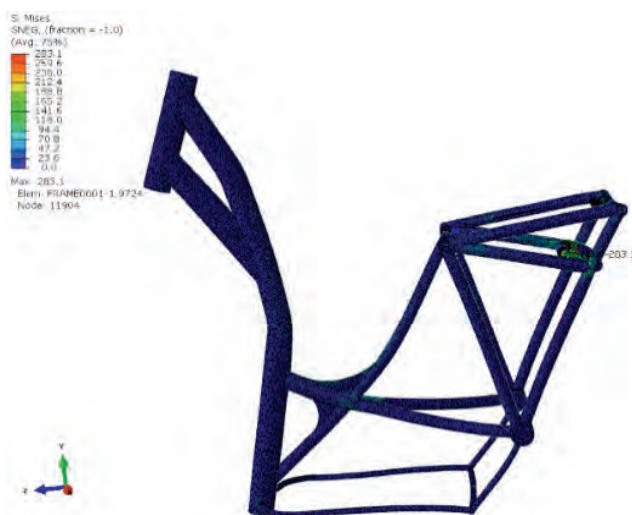
Dzięki analizie MES możliwa była optymalizacja ramy. Pierwotny projekt nie był zgodny z założeniami. Konieczne było wprowadzenie zmian. Analiza MES została przeprowadzona dla przypadku obciążenia statycznego, dla przypadku hamowania oraz przyspieszenia. Tabela 5 przedstawia naprężenia oraz odchylenia w ramie powstałe podczas badania różnych przypadków obciążeń.

Tabela 5. Przypadki obciążeń ramy

| Przypadek | Obciążenie[MPa] | Odchylenie [mm] |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| Grawitacja | 141,6 | 0,5 |
| Podwójna grawitacja | 283,1 | 1,1 |
| Gwałtowne hamowanie | 309,3 | 3,1 |
| Przyspieszenie | 262,8 | 2,7 |
| Sztywność wzdłużna | – | 1,1 |
| Sztywność skrętna | – | 7,3 |

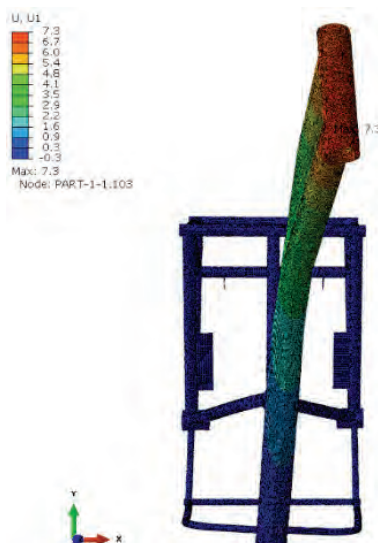
Punkty ramy w których następują spiętrzenia naprężeń występują przy główce ramy, na profilu łączącym główkę ze szkieletem ramy i w miejscu montowania amorty-

zatorów. Biorąc pod uwagę możliwe dołączane moduły i niepewność związaną z maksymalnym obciążeniem statycznym pojazdu przeprowadzono analizę (rys. 5), która pokazuje, że nawet przy podwójnym maksymalnym obciążeniu statycznym rama nie ulegnie zniszczeniu.



Rys. 5. Analiza naprężeń przy maksymalnym obciążeniu statycznym

Największe naprężenia powstają przy hamowaniu awaryjnym, co jest spowodowane największą siłą oddziaływującą na ramę.



Rys. 6. Analiza sztywności skrętniej

Sztywność skrętna została policzona według procedury Rinarda. Wizualizację wyników przedstawia rysunek 6. Procedura ta jest zwykle stosowana do analizy wyężeniowej ram. Sztywność została policzona dla maksymalnej siły skręcania – 1793 N. Odchylenie od głównej płaszczyzny ramy wyniosło 7,3 mm co nadal mieści się w założonym przedziale, lecz może powodować zmęczeniowe uszkodzenie ramy.

7. WNIOSKI

Rama zaprojektowana na potrzeby lekkiego skutera elektrycznego LEM sprostą wszystkim założeniom postawionym podczas fazy projektowej. Metoda Elementów Skończonych pozwoliła na określenie jej wytrzymałości i sztywności oraz na późniejszą optymalizację oraz redukcję naprężeń maksymalnych. Koncepcja jednego okrągłego profilu łączącego szkielet ramy z główką wyraźnie obniżyła wytrzymałość. Konieczne było zastosowanie profilu o większej średnicy i grubszych ściankach co zmniejszyło oszczędność masy wynikającą z takiego rozwiązania.

LITERATURA

- [1] DACKO M., BORKOWSKI W., DOBROCIŃSKI S., NIEZGODA T., WIECZOREK M., *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*, Arkady, Warszawa 1994.
- [2] RAKOWSKI G., KACPRZYK Z., *MES w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [3] RUSIŃSKI E., CZMOCHOWSKI J., SMOLNICKI T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [4] FOALE T., *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and the science*, Morrisville, United States, 2002.
- [5] ZIENKIEWICZ O.C., TAYLOR R.L., *Finite Element Method*. Vol. 1. *The Basis*, 5th ed., Elsevier 2000.
- [6] ZIENKIEWICZ O.C., TAYLOR R.L., *Finite Element Method*. Vol. 2. *Solid Mechanics*, 5th ed., Elsevier 2000.

*Wigry 3, wolnobiegi, silnik bezszczotkowy prądu stałego,
bateria litowo-jonowa, układ hamulcowy, mocowanie baterii*

Piotr MIERZWIAK*

WIGRY 4 ROWER ELEKTRYCZNY – ZAŁOŻENIA ORAZ OPIS WYKONANYCH POSTĘPÓW W REALIZACJI PROJEKTU

Referat krótko przedstawia założenia projektu Wigry 4 realizowanego przez członków Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych działającego przy Politechnice Wrocławskiej. Następnie skupia się na kolejnych etapach realizacji projektu wraz z opisem rozwiązań i problemów, jakie pojawiły się przed konstruktorami. Przedstawia także wyzwania, z jakimi muszą się jeszcze zmierzyć w celu usprawnienia swojego prototypu.

1. WSTĘP

Z każdym kolejnym rokiem na polskich drogach, ścieżkach rowerowych i w parkach pojawia się coraz więcej rowerów. Wielu młodych ludzi wybiera je jako środek transportu w większych miastach, rezygnując z tradycyjnych środków lokomocji, takich jak komunikacja miejska. Władze miast i samorządów wychodzą im naprzeciw otwierając kolejne wypożyczalnie rowerów miejskich lub uatrakcyjniając już istniejące punkty. Kolejnym trendem, coraz bardziej popularnym wśród cyklistów, jest rozbudowa tradycyjnego napędu rowerowego, wymagającego siły użytkownika, i rozszerzenie go o napęd elektryczny. Takie rozwiązanie znacznie zwiększa dynamikę jazdy oraz obniża konieczną ilość wkładanego w nią wysiłku. Poprawia to jej komfort i wydłuża trasę, jaką jesteśmy w stanie jednorazowo pokonać.

2. ZAŁOŻENIA PROJEKTU

Założeniem projektu Wigry 4 było skonstruowanie roweru miejskiego zaopatrzonego w napęd elektryczny, wyróżniającego się wyglądem oraz osiąganymi na tle innych rowerów. Kolejnym istotnym aspektem projektu było zapewnienie oryginalności sa-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

mego jednośladu oraz wskrzeszenie jednej z legend polskiego przemysłu rowerowego. W tym celu zdecydowaliśmy się wykorzystać doskonale wszystkim znane Wigry 3 (rys. 1). Rowery produkowane przez polską firmę Romet, które przez długie lata były niedoścignionym wzorem prostoty połączonej z praktycznością oraz pomysłowością, idealnie wpisywały się w założenia naszego projektu. Potwierdzeniem tej tezy jest fakt, że rowery z Bydgoszczy mogły zostać bez problemu złożone w pół, co znacznie ułatwiało ich przechowywanie czy transport.



Rys. 1. Wigry 3

3. DLACZEGO WIGRY 3

Wymagania, jakie stawia się rowerom dedykowanym do jazdy miejskiej, to przede wszystkim duży komfort jazdy oraz bezpieczeństwo. Tradycyjne rowery miejskie – tak zwane holenderki – posiadają duże gabaryty, zbudowane są na kołach 28-calowych. Są niezwykle wygodnymi jednośladami, ponieważ osoba poruszająca się na nich znajduje się w pozycji wyprostowanej, która jest znacznie wygodniejsza niż ta, którą przyjmuje się na rowerach górskich. Jednakże jest to osiągnięte kosztem rozmiarów konstrukcji. Są to rowery duże i ciężkie, przez co użytkownicy mogą mieć problemy z prowadzeniem ich, a także przemieszczaniem się w ciśniejszych zaułkach miast. Natomiast konstrukcja bydgoskiej firmy Romet, która powstała już w latach 70. XX. wieku i była produkowana nieprzerwanie aż do 1998 roku, posiada te same zalety, co wyżej wspomniane rowery. Wigry 3 zapewniają użytkownikom wyprostowaną pozycję ciała, jednocześnie zachowując stosunkowo niewielkie rozmiary. Udało się to osiągnąć dzięki nietypowemu kształtowi ramy, charakterystycznej dla tej polskiej konstrukcji. Są to rowery o stosunkowo niewielkiej masie, mogące bez problemu poruszać się na węższych odcinkach drogi, oraz łatwe w prowadzeniu. Każdy egzemplarz posiada dynamo, które znajduje się przy przednim kole. Zapewnia ono napięcie odpowiednie

do zasilenia dwóch lamp, co zwiększa bezpieczeństwo na drodze. Kolejnym ogromnym atutem tej konstrukcji jest jej historia. Łączy pokolenia Polaków i budzi wspomnienia wśród starszych ludzi, ponieważ dla wielu z nich był to ich pierwszy, wymarzony rower. Także wśród młodych Wigry cieszą się ogromną popularnością i stają się coraz bardziej obecne w popkulturze.

4. PRACE WYKONANE PRZY KONSTRUKCJI NOŚNEJ

Jednym z naszych fundamentalnych założeń było zaadaptowanie oryginalnej ramy na rzecz projektu. Przede wszystkim, po wielu latach eksploatacji, nie nadawała się ona do wykorzystania. Wymagała gruntownego remontu w postaci lakierowania oraz wymiany wszelkich elementów mechanicznych. Uszkodzenie łożysk, znajdujących się w suporcie oraz główce ramy, było prawdopodobnie spowodowane niewłaściwym serwisowaniem i długoletnią eksploatacją roweru. Zniszczeniu uległa piasta, znajdująca się w przednim kole. W celu umożliwienia niezależnego obracania się silnika bez konieczności równoległego obracania pedałow, niezbędne było zastosowanie wolnobiegu (rys. 2). Jest to prosty mechanizm zębatkowo-zapadkowy, który można nazwać „sprzęgłem jednokierunkowym” umożliwiającym przeniesienie napędu z przekładni na koło oraz swobodny obrót koła w kierunku jazdy. Pierwotnie w tego typu rowerach także stosowany był wolnobieg innego typu – tzw. Torpedo, który blokował tylne koło, gdy użytkownik kręcił pedałami w drugą stronę. Oczywiście była to jedna z istotniejszych części układu hamulcowego stosowanego w pierwowzorze.



Rys. 2. Wolnobieg zastosowany w projekcie

5. WYKORZYSTANY SILNIK

Kolejnym etapem było stworzenie układu napędu elektrycznego, który mógłby zostać zastosowany w naszym projekcie. Jednostką napędową wykorzystaną w konstrukcji jest bezszczotkowy silnik prądu stałego. Swoją nazwę zawdzięcza zastosowa-

niu magnesów trwałych w miejscu uzwojeń wirnika. Pozwala to na wyeliminowanie pierścieni ślizgowych znajdujących się na wale wirnika, poprzez które było dostarczane napięcie na wyżej wspomniane cewki wirnika. Takie rozwiązanie miało istotny wpływ na właściwości tego typu silnika. Zalety silnika bezszczotkowego:

- brak komutatora mechanicznego, który w tradycyjnych silnikach prądu stałego jest kłopotliwy w eksploatacji,
- brak uzwojeń miedzianych zapewnia doskonałe parametry dynamiczne wynikające z małej indukcyjności uzwojeń fazowych oraz małej bezwładności wirnika,
- wysoka sprawność silnika dzięki zastosowaniu magnesów trwałych jako źródła wzbudzenia (brak strat w miedzi wirnika),
- zmniejszenie średnicy wirnika, a co za tym idzie – wymiarów i masy.

Jednak takie rozwiązania konstrukcyjne silników nie są rozwiązaniami idealnymi. Podstawową wadą jest wysoki koszt wytworzenia takiego silnika oraz konieczność zastosowania sterownika elektronicznego. Kolejnym problemem jest duża wrażliwość magnetyczna na przekroczenie dopuszczalnych temperatur. Także dostarczenie zbyt wysokiego prądu, przekraczającego dopuszczalny zakres, może doprowadzić do zniszczenia magnesów poprzez zjawisko koercji (odmagnesowanie).



Rys. 3. Silnik Magic Pie

Silnikiem wykorzystanym w projekcie jest silnik Magic Pie (rys. 3) wyprodukowany przez kanadyjską firmę Golden Motor. Jego ogromnymi atutami są niewielkie gabaryty oraz cały układ sterujący pracą jednostki napędowej umieszczony w piaście koła. Dzięki temu jego aplikacja jest znacznie prostsza i wymaga niewielkiej ingerencji w oryginalną konstrukcję nośną roweru. Moc silnika wynosi 1000 W, więc pozwala na wygenerowanie momentu rzędu 28 Nm, co przy obecnej masie konstrukcji, i średniej wadze rowerzysty wynoszącej 70 kg, pozwala na osiągnięcie prędkości przekraczające nawet 55 km/h. Dla rowerów elektrycznych wykorzystujących silnik o podobnych parametrach, konstruowanych na bazie tradycyjnych rowerów miejskich, jest to pułap nie do osiągnięcia.

6. BATERIA

Następnym etapem prac nad realizacją projektu był dobór odpowiedniego źródła zasilania, które zapewni stabilną pracę silnika. Obecnie w pojazdach z napędem elektrycznym przeważnie stosuje się baterie posiadające ogniwa litowo-jonowe. Wykazują one korzystny stosunek pojemności do jej masy i rozmiarów. Zdecydowaliśmy się wykorzystać baterię o pojemności 9 Ah, napięciu 48 V oraz masie 3,3 kg. Takie parametry w pełni spełniają nasze oczekiwania.

7. STAN OBECNY PROJEKTU

Obecny stan prac nad projektem (rys. 4) umożliwił przeprowadzenie pierwszych jazd kontrolnych. Dzięki nim zebraliśmy wiele niezbędnych informacji, które posłużą nam w dalszych pracach nad udoskonaleniem tego prototypu. Jednym z naszych większych osiągnięć było uzyskanie prędkości maksymalnej rzędu 45 km/h.



Rys. 4. Obecny stan projektu

8. DALSZE PRACE

Kolejnym dużym wyzwaniem, jakie czeka nas w czasie realizowania wszystkich założeń projektu, jest skupienie się na bezpieczeństwie rowerzysty korzystającego z naszego pojazdu. W tym celu niezbędna będzie modernizacja całego układu hamulcowego. Oryginalny, z hamulcami szczękowymi, nie jest w stanie zatrzymać tak du-

żego momentu generowanego przez silnik, czego efektem jest między innymi całkowite wygięcie się jednej ze szcęk hamulca. W tym celu musimy zaadoptować ramę wykorzystania hamulców tarczowych, które zapewnią odpowiednio krótszą drogę hamowania, czyli zwiększą bezpieczeństwo użytkownika. Kolejnym problemem, z którym musimy się zmierzyć, jest zaprojektowanie nowego uchwytu na baterię. Obecnie wykorzystujemy stelaż oryginalnego bagażnika, który był fabrycznie montowany w Wigrach 3. Jednak jest to rozwiązanie prowizoryczne, sprawdzające się wyłącznie w czasie krótkich testów, i nieodporne na drgania wynikające z poruszania się po nierównej powierzchni. Aby zapewnić wymaganą stabilność baterii konieczne będzie przygotowanie własnego, autorskiego uchwytu na baterię, ograniczającego jej drgania w czasie jazdy i chroniącego ją przed uszkodzeniami. Kolejnym celem, który nam przyświeca, jest odtworzenie w jak najlepszym stopniu oryginalnej konstrukcji idące w parze z jak największym uatrakcyjnieniem roweru.

9. PODSUMOWANIE

Projekt jest cały czas rozwijany o kolejne koncepcje, które mają na celu poprawienie jego funkcjonalności i optymalizację wprowadzonych dotychczas usprawnień. Dzięki zaangażowaniu członków KN PiRM projekt będzie wciąż udoskonalany.

LITERATURA

- [1] KRYKOWSKI K., *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym: analiza, właściwości, modelowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [2] ZAWIRSKI K., *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [3] JANISZEWSKI D., *Bezczujnikowy napęd z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych oparty na bezśladowym filtrze Kalmana*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, 86, 169–174.
- [4] SPAGNOL P., ALLI G., SPELTA C., LASANTI P., TODESCHINI F., SAVARESI S.M., MORELLI A., *A full hybrid electric bike: How to increase human efficiency*, American Control Conference, 2012, 2761–2766.
- [5] PANG-CHIA CHEN, HUAN-YU LIN, SHUE-BIN CHANG, YU-CHE HUANG, *The torque control of human power assisted electric bikes*, International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 2010, 373–378.

*analiza elementów konstrukcyjnych i napędowych,
motoryzacja, SmartMoto Challenge, skuter,
konstrukcja, wahacz, zawieszenie,
metoda elementów skończonych,
analiza porównawcza*

Wojciech PAWLAK*

LEKKI ELEKTRYCZNY MOTOCYKL. ANALIZA PORÓWNAWCZA TYPÓW ZAWIESZENIA ZASTOSOWANYCH W LEM 2014 ORAZ LEM NAPOLI

W artykule dokonano analizy porównawczej dwóch typów zawieszenia, które zastosowano w konstrukcjach LEMa 2014 oraz LEMa Napoli. Omówiono wady i zalety obydwu typów wahaczy oraz materiałów w nich zastosowanych. Przedstawiono również wyniki analizy Metodą Elementów Skończonych z opisem warunków brzegowych oraz zasad ich doboru.

1. ZAWODY SMARTMOTO CHALLENGE

Zawody SmartMoto Challenge to jedno z najważniejszych wydarzeń w roku dla Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych. Studenci tej organizacji startują w zawodach już po raz trzeci. Poprzednie dwie edycje zawodów w Hiszpanii zakończyli na III, a następnie na I miejscu w klasyfikacji generalnej. Same zawody polegają na skonstruowaniu elektrycznego motocykla, opartego na komponentach firmy ELMOTO – akumulatorze 48 V, 31,5 Ah, silniku bezszczotkowym prądu stałego o mocy 2 kW oraz sterowniku kierującym pracą pozostałych elementów. Tematem tegorocznych zawodów jest projekt i wykonanie motocykla służącego do przewozu pizzy. Rywalizować będą drużyny z całego świata w szeregu konkurencji statycznych oraz dynamicznych. Po zwycięstwie w zawodach w 2014 roku (rys. 1) drużyna z Politechniki Wrocławskiej planuje kolejny raz zdeklasować rywali.

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.



Rys. 1. Zwycięski motocykl z zawodów SmartMoto Challenge 2014

2. PROJEKTOWANIE MOTOCYKLA ELEKTRYCZNEGO

Projektowanie elektrycznego motocykla laikowi może здаwać się zadaniem zdecydowanie prostszym od zaprojektowania klasycznego motocykla spalinowego. Częściowo stwierdzenie takie byłoby zgodne z prawdą. Jednakże warto wziąć pod uwagę, iż w nowoczesnym elektrycznym motocyklu, systemy elektroniczne oraz sterowania pojazdem są zdecydowanie bardziej zaawansowane niż w motocyklu spalinowym. Jeżeli doda się do tego najnowocześniejsze gadzety, takie jak zastosowanie telefonów komórkowych czy tabletów, w taki sposób, by miały wpływ na działanie pojazdu, dochodzi bardzo skomplikowany proces tworzenia oprogramowania. Warto dodać, iż oprogramowanie to musi być kompatybilne z jak największą ilością urządzeń i korzystać z wielu zdobyczy techniki, takich jak nawigacja GPS, Internet, media społecznościowe.

Podobnie jak rok temu, projekt designu motocykla wrocławskich studentów, wykonało biuro konstruktorskie KoziółekDesign (rys. 2).



Rys. 2. LEM Napoli – projekt designu wykonany przez KoziółekDesign

Mając wzór wyglądu, podstawowe warunki brzegowe takie jak:

- Baza kół,
- Kąt główki ramy,
- Średnica kół,
- Linie średnie umiejscowienia kierownicy oraz siedziska, wyznaczone za pomocą stanowiska ergonomicznego (rys. 3),

konstruktorzy KN PiRM mogli przejść do jednego z najważniejszych etapów projektowania motocykla: konstrukcji i obliczeń ramy oraz zawieszenia. Do zaprojektowania ramy oraz zawieszenia, studenci użyli oprogramowania Autodesk Inventor 2015 – modułu generatora ram. Jest to moduł zawierający biblioteki z wieloma materiałami inżynierskimi oraz całą gamą profili oraz kształtowników, które można wykorzystać w celu stworzenia dowolnej konstrukcji ramowej bądź kratownicowej.



Rys. 3. Pomiary na stanowisku ergonomicznym

3. ZASTOSOWANIE METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH – MES

MES jest metodą konsekwentnego poszukiwania przybliżonych rozwiązań problemów brzegowych. Cechą zasadniczą [...] jest zastępowanie układu o nieskończonej liczbie stopni swobody układem o liczbie skończonej [1]. Metoda Elementów Skończonych w mechanice stanowi nieocenioną pomoc dla inżynierów. Umożliwia, w stosunkowo krótkim czasie, obliczenie naprężeń, charakteru przepływów czy też aerodynamiki elementu maszynowego lub nawet całej maszyny. Pierwszym krokiem w celu przeprowadzenia analizy jest zdecydowanie, czy zastosuje się modele bryłowe,

czy powierzchniowe badanego elementu maszynowego. W wypadku analizy zawieszenia oraz ramy, zarówno w LEMie 2014 jak i Napoli, studenci w celach obliczeniowych wykorzystali modele powierzchniowe. Gwarantują one wystarczającą dokładność obliczeń oraz ich krótki czas. Po stworzeniu modelu, kolejnym krokiem jest jego dyskretyzacja, czyli potocznie – nałożenie siatki złożonej z dobranego rodzaju elementów. Po dyskretyzacji model analizowanej części składa się już ze skończonej liczby elementów, jak najwierniej odwzorowujących jego pierwotny kształt. Każdy element jest opisany prostą funkcją kształtu, w zależności od parametrów analizy, kwadratową bądź liniową. Elementy w siatce połączone są w punktach zwanych więzami.

Następnym krokiem jest ułożenie macierzy przez komputer, które zawierają funkcje kształtu wszystkich elementów oraz funkcje aproksymujące (służą do przybliżenia danych wielkości fizycznych) opisujące odkształcenie. Dla znanego przemieszczenia i odkształcenia we wszystkich elementach oraz dla znanych właściwości materiału konstrukcyjnego, można wyznaczyć naprężenia występujące w każdym elemencie modelu. [2]

4. KONSTRUKCJE WAHACZY LEM 2014 ORAZ LEM NAPOLI

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawione są wahacze dwóch kolejnych motocykli studentów Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych. Jak widać na ilustracjach, jednym z głównych kryteriów konstrukcji wahacza na rok 2015 była masa. Ilość profili została zminimalizowana, a ich materiał ze stali C45 zmieniono na stop aluminium 6061. Jest on jednym z najpopularniejszych stopów stosowanych w konstrukcjach ramowych.



Rys. 4. Wahacz LEMa Napoli



Rys. 5. Wahacz LEMa 2014

Definicja obciążeń wahaczy LEMa 2014 oraz LEMa Napoli

W konstrukcjach tego typu obciążenia pochodzą zwykle z dwóch źródeł: grawitacji oraz siły odśrodkowej. Pierwsza z nich powoduje największe naprężenia, druga zaś – największe odkształcenia. Naprężenia pochodzące od grawitacji ogranicza się zwykle podaniem maksymalnego obciążenia pojazdu. Warunki, w których może zaistnieć sytuacja maksymalnego obciążenia dla danej konstrukcji, powinny być ekstremalne. W wypadku miejskiego motocykla, mogłyby one zostać spełnione na przykład podczas tzw. „dobicia” amortyzatora przy zjeździe z przeszkody, oraz przy maksymalnym obciążeniu nośnym. W takiej sytuacji amortyzator zamiast rozpraszać energię, przekazuje ją w całości na elementy konstrukcyjne ramy oraz wahacza [4], [5].

Dokładną wartość siły, jaka została użyta w analizie MES, określono za pomocą wzoru:

$$F = m * n * g * \%tył * x_w \quad (1)$$

F – siła działająca na tylną oś,

m – masa pojazdu,

$n * g$ – krotność przyśpieszenia ziemskiego,

$\%tył$ – procent masy pojazdu przypadający na tylną oś od środka ciężkości,

x_w – przyjęty współczynnik bezpieczeństwa.

Zatem dla LEMa 2014 wynosi ona:

$$F = 200 \text{ kg} * 2 * 9,81 * 1,5 = 5167,9 \text{ N}$$

Zaś dla LEMa Napoli:

$$F = 200 \text{ kg} * 2 * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} * 75,8\% * 1,5 = 4461,58 \text{ N}$$

Obciążenie z drugiego przypadku, czyli działające na konstrukcję podczas skręcania, obliczono z prostego wzoru:

$$F_{\text{odśr}} = \frac{mv^2}{R} * x_w \quad (2)$$

gdzie:

$F_{\text{odśr}}$ – siła odśrodkowa,

m - masa pojazdu,

v – maksymalna prędkość osiągana przez skuter,

R – minimalny promień toru ruchu przy prędkości maksymalnej.

Zatem w LEMie 2014 oraz w LEMie Napoli:

$$F_{\text{odśr}} = \frac{200\text{kg} * \left(16,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{40,5\text{m}} * 1,5 = 2058,44 \text{ N}$$

Siła odśrodkowa w obydwu przypadkach jest obliczeniowo podobna ze względu na niewielkie różnice konstrukcyjne oraz dynamiczne. W analizach wytrzymałościowych, maksymalna siła odśrodkowa podczas skręcania została przyłożona w miejscu mocowania tylnego koła. Zapewniło to najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia wahaczy.

a) Warunki brzegowe

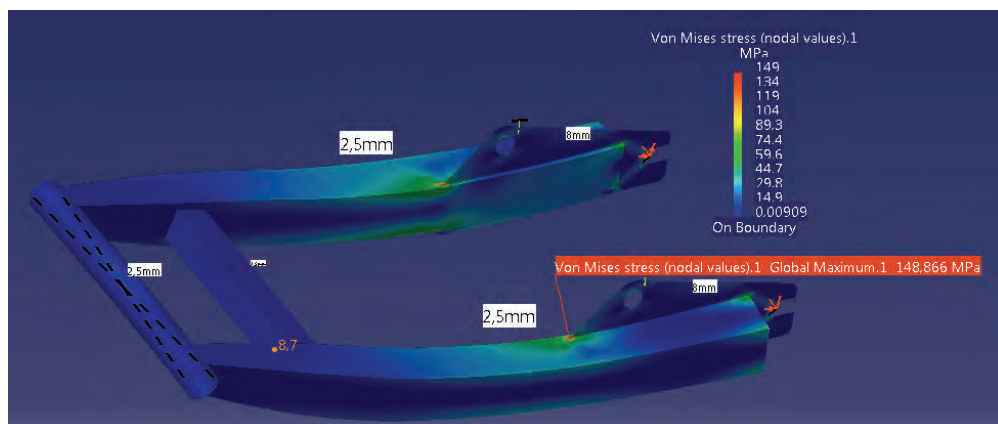
Aby analiza wytrzymałościowa mogła przebiec poprawnie, należy odebrać wszystkie odpowiednie stopnie swobody konstrukcji. Zarówno w konstrukcji z 2014 jak i z 2015 roku, proces ten przebiegał podobnie. W osi wahacza należało odebrać wszystkie stopnie swobody poza rotacją dookoła niej. W osi koła – translację w górę oraz wzdłuż osi, ponieważ realnie wahacz pod obciążeniem pochodzącym od grawitacji, może się wydłużać ze względu na sposób mocowania amortyzatora. Jedyną odebrana rotacja to rotacja wokół osi wahacza. Oprogramowanie posiadające moduły do obliczeń MES, takie jak Catia V5, umożliwia automatyczne odebranie stopni swobody w takich miejscach. W przypadku działania siły odśrodkowej podczas skręcania, w miejscu mocowania wahacza wszystkie translacje zostały zablokowane. Wtedy siłę należy przyłożyć w miejscach mocowania osi koła, zamiast w miejscach mocowania amortyzatorów. W miejscach mocowania amortyzatora odbiera się translacje wzdłuż osi wahacza oraz do góry i rotacje przyporządkowane tym dwóm kierunkom.

b) Wyniki analizy MES

Po serii obliczeń MES i optymalizacjach, jakim należało poddać obie konstrukcje, uzyskano wyniki spełniające wszystkie założenia projektowe, w tym najważniejsze – kryterium maksymalnych naprężeń oraz odkształceń. Wyniki przedstawia rys. 6. oraz rys. 7.



Rys. 6. Analiza wahacza LEMa Napoli



Rys. 7. Analiza wahacza LEMa 2014

5. WNIOSKI ORAZ KIERUNEK DALSZYCH PRAC

Zaprojektowane wahacze spełniają wszystkie przyjęte na początku założenia. Wersja wahacza z 2014 roku ważyła ok. 2,6 kg, zaś wersja wahacza do LEMa Napoli tylko 0,81 kg. Różnice mas pochodzą oczywiście z różnic materiałowych – gęstość właściwa stali to $7,8 \text{ g/cm}^3$, zaś aluminium tylko $2,7 \text{ g/cm}^3$. Są one częściowo kom-

pensowane faktem, iż stalowy wahacz zawieszony był tylko na jednym amortyzatorze, podczas gdy wahacz aluminiowy korzysta już z dwóch. Powodem takiego rozwiązania była niedostateczna sztywność tylnego zawieszenia z poprzedniego roku. Zmiana geometrii wahacza wynikała ze zbyt dużego przełożenia siły oraz została przeprowadzona w celu redukcji masy nieresorowanej.

LITERATURA

- [1] RUSIŃSKI E., *Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M.*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1994.
- [2] DZIERŻANOWSKI G., SITEK M., *Samouczek Metody Elementów Skończonych dla studentów Budownictwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [3] FOALE T., *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and the science*, Morrisville, United States, 2002.
- [4] WARECKI R., *Amortyzatory – rola w pojeździe i eksploatacja*, www.autokult.pl, Wrocław 2011.
- [5] PAWLAK W., GODLEWSKI T., *Lekki Elektryczny Motocykl – konstrukcja, obciążenia, zawieszenie*, Polska, 2014.

*analiza elementów konstrukcyjnych i napędowych,
motoryzacja, SmartMoto Challenge, skuter, konstrukcja,
wahacz, zawieszenie, metoda elementów skończonych*

Wojciech PAWLAK*
Tomasz GODLEWSKI*

LEKKI ELEKTRYCZNY MOTOCYKL. KONSTRUKCJA, OBCIĄŻENIA, ZAWIESZENIE

W referacie przedstawiono, jak i dlaczego zaprojektowano Lekki Motocykl Elektryczny na zawody SmartMoto Challenge 2014. Uczestnicy Rajdokonferencji poznają Metodę Elementów Skończonych oraz sposób wykorzystania tej metody wspomagania komputerowego do zaprojektowania wahacza motocykla. Na przykładzie projektu studentów z Politechniki Wrocławskiej opisano stadia projektowania motocykla i przykładowe problemy jakie można w trakcie konstrukcji pojazdu tego typu.

1. O ZAWODACH SMARTMOTO CHALLENGE

SmartMoto Challenge to zawody, których druga już edycja odbędzie się w tym roku w Barcelonie. Jest to wyzwanie rzucone studentom uczelni technicznych z całego świata. Głównym założeniem konkursu jest skonstruowanie lekkiego motocykla elektrycznego, który będzie dawał możliwość sprawnego poruszania się po mieście zużywając przy tym jak najmniejszą ilość energii. Zawody te to doskonała okazja dla młodych inżynierów, pragnących zabłysnąć na międzynarodowej arenie, sprawdzić wiedzę teoretyczną, zdobytą na uczelni, w praktyce i zaprojektować coś, co będzie wykonane i użytkowane. Rok temu studenci z Politechniki Wrocławskiej wywalczyli trzecie miejsce na podium. Ich projekt odznaczał się przede wszystkim świetnymi właściwościami jezdnyymi oraz niskim kosztem produkcji [1]. W tym roku drużyna Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych reprezentująca Politechnikę Wrocławską ma nadzieję walczyć o zwycięstwo w zawodach.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2. ETAPY PROJEKTOWANIA MOTOCYKLA

W jaki sposób zaprojektować pojazd dwukołowy o lekkiej konstrukcji i stosunkowo tani w produkcji? (rys. 1). To pytanie postawiono przed studentami z Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych Politechniki Wrocławskiej, gdy tylko udało się skompletować zespół w ramach projektu SmartMoto Challenge. Nie było to łatwe zadanie, jednak wykonalne. Jak wiadomo, każda szanująca się firma motoryzacyjna dba o design swoich produktów. Ochoczo korzystają z artystycznych wizji, mniej lub bardziej futurystycznych. Studentom z Politechniki Wrocławskiej z pomocą przyszli znajomi z zespołu Koziolkedesign prezentując wizję designu skutera, która została przez wszystkich zaakceptowana.



Rys. 1. Schemat powstawania produktu [2]

Kolejnym etapem było określenie podstawowych wymiarów i zależności mechanicznych. Pierwszą wielkością, która najlepiej określa gabaryty pojazdu dwukołowego zawsze jest rozstaw osi. W dużej mierze decyduje on o zwrotności pojazdu. Mając na uwadze fakt, iż skuter ma być przeznaczony głównie do jazdy w warunkach miejskich, młodzi inżynierowie musieli tę wielkość odpowiednio wyznaczyć.

Następnym parametrem był kąt główki – on z kolei wpływa na łatwość pokonywania zakrętów i stabilność podczas jazdy na prostej drodze. W wąskich i krętych miejskich uliczkach jego wartość ok. 20° zapewnia wygodne poruszanie się zarówno na prostej drodze jak i na zakrętach, natomiast maksymalna prędkość ograniczona do 60 km/h nie wymaga dużej siły stabilizacji. Gdy już ustalono gabaryty skutera, przyszła kolej na projektowanie konstrukcji nośnej. Uzbrojeni w dane

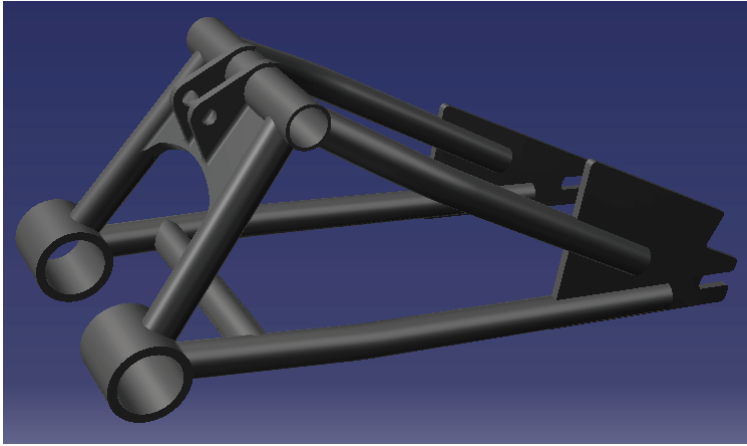
antropometryczne oraz własne pomysły, studenci Politechniki zaprojektowali stanowisko ergonomiczne dla pojazdów dwukołowych, dzięki któremu zbadali najwygodniejsze konfiguracje dla osób o różnym wzroście i sylwetce. Powstała chmura punktów, dokumentująca najwygodniejszą pozycję dla każdego z osobna, co pozwoliło wygenerować optymalną konfigurację podstawowych wielkości. Tu bardzo pomocny był projekt ekipy z Koziolkdesign – nadawał on już samej konstrukcji nośnej charakter. Zmusiło to studentów do rozwiązania złożonego problemu – zaprojektowania skutera tak, by spełniał wymagania gabarytowe, był zgodny z wizją projektanta i, co najważniejsze, posiadał odpowiednie właściwości wytrzymałościowe. Za pomocą oprogramowania komputerowego wspomaganego projektowania, takiego jak Catia, Autodesk Inventor czy też Siemens NX wykonany został model przestrzenny wszystkich części pojazdu. Gdy wstępne modele były ukończone, należało poddać je wielokrotnej analizie naprężeń z pomocą Metody Elementów Skończonych.

3. ZASTOSOWANIE METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH – MES

MES jest metodą konsekwentnego poszukiwania przybliżonych rozwiązań problemów brzegowych. Cechą zasadniczą [...] jest zastępowanie układu o nieskończonej liczbie stopni swobody układem o liczbie skończonej [2]. W mechanice służy ona do analizy stanu naprężeń – dzięki niej oraz hipotezie wyężeniowej Hubera, Misesa oraz Hencky’ego inżynierowie są w stanie określić naprężenia zredukowane w liczonym elemencie maszynowym. Pierwszym krokiem, wraz z określeniem materiału, jest wykonanie modelu bryłowego lub powierzchniowego. Gdy model jest już gotowy, należy stworzyć model dyskretny, czyli nałożyć siatkę. Operacja ta nie jest niczym innym, jak podzieleniem modelu bryłowego lub powłokowego na skończoną liczbę elementów, opisanych prostymi funkcjami kształtu – zazwyczaj liniowymi bądź kwadratowymi. Wszystkie sąsiednie elementy są połączone ze sobą w punktach zwanych węzłami. Istnieje wiele rodzajów elementów. Różnią się one zarówno kształtem, jak i ilością węzłów, a więc funkcjami je opisującymi, ilością stopni swobody, a w konsekwencji skomplikowaniem i czasem obliczeń, a przede wszystkim, dokładnością wyników. Następnie komputer układu macierze zawierające funkcje kształtu wszystkich elementów w modelu oraz funkcje aproksymujące (wielomiany przybliżające dane wielkości fizyczne), opisujące odkształcenie – przemieszczenie się węzłów oraz zmianę geometrii wewnętrznej elementu. Gdy znamy przemieszczenie oraz odkształcenie we wszystkich elementach, a zatem wszystkich powierzchniach i całym modelu, właściwości materiału, z jakiego dana konstrukcja będzie wykonana – mamy naprężenia, jakie występują w każdym węźle oraz przemieszczenie danego fragmentu liczonego elementu maszynowego [3].

4. KONSTRUKCJA WAHACZA LEKKIEGO MOTOCYKLA ELEKTRYCZNEGO 2014

Kiedy etap dobierania podstawowych wielkości geometrycznych ramy oraz tworzenia modeli 3D został zakończony, zwrócono uwagę w kierunku tylnego zawieszenia. Przed ostateczną wersją wykonano kilka prototypowych modeli w oprogramowaniu CAD. Dzięki konsultacjom między członkami załogi i wielokrotnym analizom MES udało się wyeliminować niedoskonałości pierwszych wersji. Jedną z pierwszych koncepcji wahacza miała masę niemal 3 kg i nie spełniała założeń wytrzymałościowych. W tego typu elementach maszynowych sztywność boczna jest niezwykle istotna, głównie z powodu sił odśrodkowych przy skręcaniu. Problem ten studenci rozwiązali



Rys. 2. Model 3D ostatecznej wersji wahacza



Rys. 3 Model powierzchniowy wahacza z oznaczonymi punktami referencyjnymi

za pomocą rurki przyspawanej w poprzek wahacza, tuż przed kołem. Kolejnym kłopotliwym szczegółem była konieczność użycia hamulców rowerowych. To, oraz niestandardowa geometria wahacza względem wahaczy rowerowych, spowodowało kłopot z mocowaniem hamulców. Do montażu użyto adaptera International Standard na Post Mount, który znacznie uprościł konstrukcję elementu mocującego zacisk hamulca. Pozostało więc tylko dobranie odpowiednich warunków brzegowych do analizy naprężeń.

4.1. DEFINICJA OBCIĄŻEŃ

W konstrukcjach nośnych tego typu obciążenia zazwyczaj dzieli się na dwie grupy: grawitacyjne oraz pochodzące od siły odśrodkowej. Pierwsza z nich powoduje w tego typu elemencie maszynowym największe naprężenia. Jak sama nazwa wskazuje, pochodzą od ciężaru pojazdu oraz jego pasażerów – parametr ten określa się pojęciem dopuszczalna masa. W przypadku wahacza najgorszy przypadek takich obciążeń zachodzi, gdy cała siła przyłożona na tylne koło w momencie zjazdu z przeszkody, np. krawężnika, nie jest przenoszona poprzez wahacz na amortyzator i konstrukcję motocykla, lecz w 100% skupiona jest na konstrukcji wahacza. W rzeczywistości zdarzenie takie jest praktycznie niemożliwe, a najbardziej zbliżona sytuacja to tzw. całkowite dobitcie amortyzatora. Zjawisko to zachodzi, gdy środek sprężysty zastosowany w amortyzatorze – sprężyna, olej, powietrze – zostaje maksymalnie ściśnięty i zamiast rozpraszać energię, przekazuje ją w całości na konstrukcję nośną. [4], [5]. Dokładną wartość siły, jaka została użyta w analizie MES, określono za pomocą wzoru:

$$F = m * n * g * \%tył * x_w$$

- F – siła działająca na tylną oś,
 m – masa pojazdu,
 $n * g$ – krotność przyspieszenia ziemskiego,
 $\%tył$ – procent masy pojazdu przypadający na tylną oś od środka ciężkości,
 x_w – przyjęty współczynnik bezpieczeństwa.
 Zatem:

$$F = 200 \text{ kg} * 2 * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} * 87,8\% * 2 = 6890,54 \text{ N} \quad (1)$$

Kąt mocowania amortyzatora:

Po określeniu siły należało wybrać odpowiedni punkt oraz kąt przyłożenia. Brano pod uwagę dwie możliwości:

- Miejsce mocowania osi tylnego koła,
- Miejsce mocowania amortyzatora.

Ze względu na możliwość dokładnego ustawienia siły pod kątem działania amortyzatora zdecydowano się na drugą opcję.

Obciążenie z drugiego przypadku, czyli działające na konstrukcję podczas skręcania, obliczono z prostego wzoru:

$$F_{\text{odśr}} = \frac{mv^2}{R} \quad (2)$$

gdzie:

$F_{\text{odśr}}$ – siła odśrodkowa,

m – masa pojazdu,

v – maksymalna prędkość osiągnięta przez skuter,

R – minimalny promień toru ruchu przy prędkości maksymalnej.

Zatem:

$$F_{\text{odśr}} = \frac{200\text{kg} * 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{40,5\text{m}} = 1373,4 \text{ N}$$

Obliczona maksymalna siła odśrodkowa podczas skręcania została przyłożona w miejscu mocowania tylnego koła – zapewniło to najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia wahacza.

4.2. WARUNKI BRZEGOWE

Kolejnym etapem przed obliczeniami było odebranie stopni swobody wahaczowi. Wszystkie utwierdzenia przykładane były do punktów referencyjnych (rys. 4) połączonych z powierzchniami odpowiedzialnymi za przenoszenie tych obciążeń za pomocą części wirtualnych. W przypadku obciążeń pochodzących od grawitacji należało zablokować wszystkie translacje przy osi tylnego koła i wszystkie translacje w osi wahacza względem punktu środkowego. W wielu programach oferujących analizę MES istnieją także specjalne narzędzia do automatycznego nadawania więzów w miejscach obrotu całej konstrukcji. W przypadku działania siły odśrodkowej podczas skręcania wszystkie translacje zostały zablokowane zarówno w miejscu mocowania osi wahacza, jak i w miejscu mocowania amortyzatora.

4.3. DYSKRETYZACJA

Do stworzenia modelu nadającego się do obliczeń należy stworzyć model dyskretny. Mówiąc inaczej, należy stworzyć model złożony z elementów opisanych węzłami i funkcjami kształtu [3]. W modelu dyskretnym wahacza użyto w przeważającej większości czterowęzłowych elementów czworokątnych powłokowych. Ten rodzaj elementów zapewnia krótki czas obliczeń oraz wystarczającą dokładność wyników.

4.4. WYNIKI ANALIZY MES

Po serii obliczeń MES i optymalizacji, jakim należało poddać wahacz, uzyskano zadowalające wyniki zarówno pod względem maksymalnych obciążeń (rys. 5), jak i przemieszczeń. Tak skonstruowany wahacz gwarantuje bezpieczeństwo i niezawodną pracę zawieszenia.



Rys. 4. Wyniki analizy – maksymalne naprężenia równe 362,5 MPa wg Hipotezy Hubera–Misesa

5. WNIOSKI ORAZ KIERUNEK DALSZYCH PRAC

Zaprojektowany wahacz spełnia wszystkie przyjęte na początku założenia. Ostateczna wersja wahacza po optymalizacjach o masie na poziomie 2,6 kg, w porównaniu do pierwszych projektów o masie ponad 3 kg, to zadowalający rezultat. Mimo to masa



Rys. 5. Zdjęcie wykonanego elementu

wydaje się być dalej dość wysoka w porównaniu do reszty konstrukcji Czynnikiem, który negatywnie wpłynął na masę wahacza był materiał. Stal C45 nie należy do najlepszych materiałów konstrukcyjnych. Został wybrany przez studentów z KN PiRM głównie ze względu na bardzo dobrą spawalność oraz stosunkowo dobre właściwości mechaniczne. W przyszłorocznej edycji SmartMoto Challenge w Barcelonie, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych planuje użyć materiałów kompozytowych. Poważnie rozważane jest wykorzystanie włókien węglowych. Materiał ten jest coraz szerzej stosowany w motoryzacji. Pomimo niezbyt wysokiej wytrzymałości na obciążenia punktowe i udarowe, odznacza się stosunkowo niską masą oraz bardzo wysoką wytrzymałością.

LITERATURA

- [1] PAJĄCZEK T., *Motocykl studentów Politechniki zdobył prestiżową nagrodę i jedzie do Barcelony*, Onet.pl, 2014.
- [2] RUSIŃSKI E., *Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M.*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1994.
- [3] DZIERŻANOWSKI G., SITEK M., *Samouczek Metody Elementów Skończonych dla studentów Budownictwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [4] FOALE T., *Motorcycle Handling and Chassis Design the art and the science*, Morrisville, United States, 2002.
- [5] WARECKI R., *Amortyzatory – rola w pojeździe i eksploatacja*, www.autokult.pl, Wrocław 2011.

*konstrukcje dla pojazdów przyszłości, ergonomia pasażerów,
stanowisko do badań ergonomii pojazd elektryczny,
skuter elektryczny*

Andrzej PIETRYKA*
Zbigniew ŻELAZNY*

BADANIA ERGONOMII LEKKIEGO ELEKTRYCZNEGO MOTOCYKLA 2015

Artykuł opisuje krótko specyfikę i genezę powstania Lekkiego Elektrycznego Motocykla. Na podstawie porównania pozycji ciała w różnych typach motocykli, wprowadza do tematyki ergonomii stosowanej w motocyklach. Każdy typ motocykla jest opisany przez tabelę zalet i wad oraz krótkie opisy kierowców motocykli. Prezentuje specjalne stanowisko do badań ergonomii kierowcy motocykla, skonstruowane przez studentów Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych. W oparciu o wyniki pomiarów dokonanych na stanowisku ergonomicznym została określona wymagana ruchliwość i zakres ruchów miejsc oparcia kierowcy (tj. podnóżka, siedziska i kierownicy). Został przedstawiony wywód o potrzebie dostosowywania siedziska do kierowcy, poprzez umożliwienie jego przemieszczania w różnych kierunkach. Opisuje pomysł wdrożenia ruchliwego siedziska w Lekkim Elektrycznym Motocyklu w przyszłych latach.

1. WSTĘP

Lekki Elektryczny Motocykl został w całości zaprojektowany i zbudowany przez członków Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych. Na potrzeby konkursu Smart Moto Challenge, w których motocykl bierze udział, zostały przeprowadzone badania związane z poprawą ergonomii w pojazdach jednośladowych. Każdego roku konstruktorzy LEMa zwiększają nacisk na kompleksowość badań ergonomicznych, chcąc udoskonalić swój produkt w tym aspekcie.

2. GENEZA POWSTANIA LEKKIEGO ELEKTRYCZNEGO MOTOCYKLA LEM NAPOLI

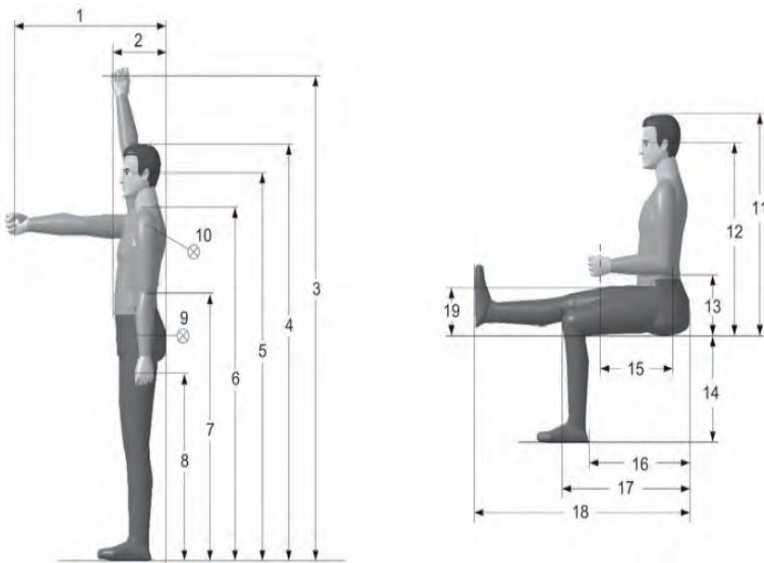
Pierwszy prototyp elektrycznego motocykla powstał w 2013 roku. Został on stworzony na potrzeby konkursu Smart Moto Challenge odbywającego się w Barcelonie.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Rok później powstał LEM 2014, który na konkursie w Barcelonie zdobył 1 miejsce w klasyfikacji ogólnej. Głównym założeniem przy projektowaniu Lekkich Elektrycznych Motocykli było stworzenie lekkiego, nowoczesnego, elektrycznego pojazdu. W bieżącym roku organizator postawił dodatkowe wymagania – motocykl ma służyć do przewozu posiłków, a dokładniej pizzy. Z tego powodu projektując LEM Napoli braliśmy pod uwagę dodatkowe akcesoria i studenci starali się w możliwie najlepszy sposób przystosować go do tego przeznaczenia. Tegoroczny motocykl będzie posiadał specjalny box na przechowywanie jedzenia. Box jest podgrzewany dzięki wykorzystaniu energii elektrycznej odzyskanej z hamowania. Wyciągana bateria i zintegrowane systemy antywłamaniowe dodatkowo mają zwiększyć popyt na ten motocykl wśród potencjalnych klientów.

3. ERGONOMIA

Podstawowym zadaniem ergonomii, jako nauki jest przystosowywanie urządzenia technicznego do psychofizycznych właściwości budowy ciała człowieka [1]. Wymagania współczesnego świata względem ergonomii stale rosną. Nowoczesny motocykl już nie tylko ma za zadanie przewieźć kierowcę i pasażera z punktu A do punktu B. Podróż nowoczesnym motocyklem powinna być komfortowa, a sam motocykl musi w pewnym sposób wspomagać kierowcę w trasie, na przykład za sprawą połączenia telefonu i funkcji nawigacji. Aby użytkownik motocykla nie czuł zmęczenia podczas jazdy, już na poziomie projektowania ramy trzeba uwzględnić aspekty ergonomii. Dlatego cechy anatomiczne człowieka, takie jak jego masa, czy wymiary kończyn mają duży wpływ na wygląd wielu komponentów Lekkiego Elektrycznego Motocykla.



Rys. 1. Punkty antropometryczne na ciele człowieka, wg normy DIN 33 402 [2]

W określaniu wymiarów człowieka skorzystano z normy DIN 33 402. Założono, że motocykl będzie użytkowany przez osoby od 5 centyla damskiego aż po 95 centyl męski. Rysunek 1 prezentuje wszystkie zawarte w normie wymiary pomiędzy punktami antropometrycznymi. Natomiast tabela 1 przedstawia wymiary antropometryczne, które brano pod uwagę podczas projektowania Lekkiego Elektrycznego Motocykla.

Tabela 1. Wybrane punkty antropometryczne DIN 33 402 [2]

| Centyl | Waga [kg] | 1 [mm] | 3 [mm] | 4 [mm] | 5 [mm] | 8 [mm] | 11 [mm] | 14 [mm] | 16 [mm] |
|----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Kobieta – 5 | 51 | 616 | 1748 | 1510 | 1402 | 664 | 805 | 351 | 426 |
| Mężczyzna – 95 | 85 | 787 | 2210 | 1841 | 1721 | 828 | 962 | 480 | 552 |

Uwzględniając fakt, że LEM Napoli ma służyć przede wszystkim do rozwożenia pożywienia, postawione zostały kolejne wymagania:

- Łatwość wsiadania i zsiadania,
- Pozycja kierowcy dostosowana do długotrwałej podróży,
- Krótki czas otwierania pojemnika z pizzami,
- Możliwość szybkiego uruchomienia.

4. SPECYFIKACJA I PORÓWNANIE KONSTRUKCJI MOTOCYKLI POD WZGLĘDEM ERGONOMII

Motocykle i skutery spalinowe mają różną budowę, jednakże można wskazać szereg głównych komponentów powtarzających się w każdym tego typu jednośladowie. Rama, która stanowi szkielet konstrukcji i połączone z nią silnik, przekładnia (skrzynia biegów), siodło, zawieszenie przednie i tylne, zbiornik paliwa oraz koła i kierownica. Warto zauważyć, że w przypadku omawianego LEM Napoli czyli motocykla elektrycznego nie występuje przekładnia i sprzęgło, a silnik jest umieszczony w piaście koła. W przestrzeni ramy musi znaleźć się tylko bateria, falownik i komputer sterujący. To sprawia, że konstrukcja ramy może przewidzieć więcej miejsca na nogi kierowcy.

Podczas tworzenia morfologii stworzyliśmy mapę przypisującą pozycję kierowcy do typu motocykla. Analizowane typy jednośladów to chopper, turystyczny, sportowy i skuter. Do stworzenia tej mapy wykorzystany został serwis www.cycle-ergo.pl [3] zawierający bazę danych oraz wizualizacje pozycji. Wyniki w tabeli 2 zestawiają dane o pozycji i kątach stawów w ciele człowieka. Są one odpowiednie dla 50 centyla mężczyzn w Polsce (175 cm wzrostu).

Na podstawie tabeli 2. Zostały określone charakterystyczne cechy każdego z typów motocykli;

1. Chopper – charakteryzuje się stosunkowo małym kątem w biodrze oraz największym wśród wszystkich typów motocykli kątem w kolanie. To sprawia,

że kierowca przyjmuje wymuszoną pozycję nóg. Lekko pochyloną do przodu sylwetką ciała i wysoko umieszczony chwyt rączek może powodować ból pleców w okolicach krzyżowych i lędźwiowych, gdyż ręce nie odciążają pleców.

2. Turystyczny – naturalna siedząca pozycja ciała nie powoduje żadnego dodatkowego napięcia pleców. Pozycja ta nadaje się idealnie na dłuższe przebywanie na motocyklu. Dodatkowe tylne oparcie odciąża plecy.
3. Sportowy – specyficzne są tu duży kąt wychylenia pleców oraz lekko podkulona pozycja (małe kąty w kolanie i biodrze). Jednakże mimo dużego kąta pochylecia użytkownicy tzw. „ścigaczy” nie skarżą się na bóle pleców, ponieważ dużą część obciążenia przenoszą na nisko usytuowaną kierownicę. Natomiast dłuższa jazda może powodować zmęczenie mięśni ud.
4. Skuter – podobnie jak w turystycznych motocyklach charakteryzuje się bardzo naturalną pozycją ciała. Dodatkowo możliwe jest szybkie zejście bez konieczności podnoszenia wysoko nóg. Często minusem jest w nich jednak zła jakość siedzisk i małe siedziska. Jest to spowodowane trendem do tworzenia tego typu pojazdów w bardzo niskich cenach.

Tabela 2. porównanie pozycji ciała w różnych typach motocykli [3]

| | Chopper | Turystyczny | Sportowy | Skuter |
|---|---|---|---|--|
| Nazwa motocykla | BMW R1200C | Kawasaki ZG1200 Voyager XII | Kawasaki Ninja 250 R | Yamaha Zuma 125 |
| Zdjęcie |  |  |  |  |
| Wysokość siedziska | 756 mm | 769 mm | 784 mm | 798 mm |
| Wychylenie pleców względem normalnej do podłoża | 8° | 0° | 21° | 0° |
| Kąt w kolanie | 110° | 101° | 78° | 98° |
| Kąt w biodrze | 75° | 85° | 71° | 79° |

W oparciu o rozmowy z motocyklistami w ramach badania ergonomii w LEM Napoli, artykułów ze specjalistycznych stron o motocyklach oraz wyżej przedstawionych opisów, została stworzona tabela wad i zalet różnych typów motocykli przedstawiona w tabeli 3.

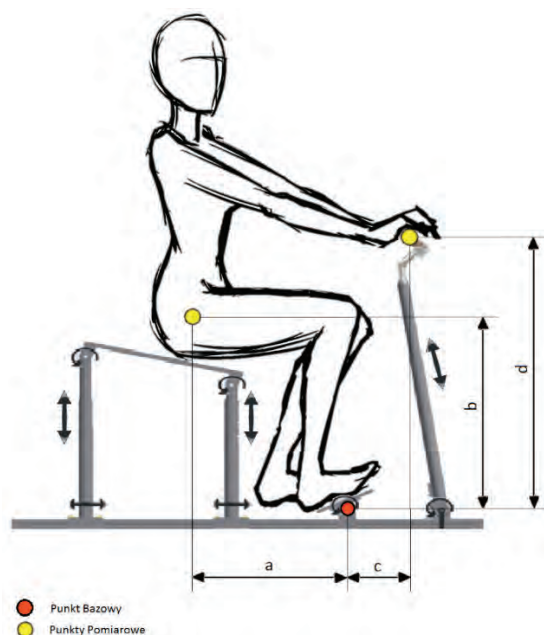
Tabela 3. Zestawienie wad i zalet różnych typów motocykli

| Typ motocykla | Zalety | Wady |
|---------------|--|---|
| Chopper | Wygodne i dobrze wyprofilowane siedziska. | Wymuszona pozycja podobna do pozycji podczas skoku w dal (nogi i ręce wyciągnięte do przodu). |
| Turystyczny | Pozwala kierowcy przyjąć prawidłową sylwetkę ciała, Często posiada dodatkowe oparcie na plecy. Idealny do długich podróży. | Duży ciężar i duże gabaryty utrudniają manewrować motocyklem podczas postoju i prowadzenia motocykla przy wyłączonym silniku. |
| Sportowy | Stosunkowo wygodna pozycja, która nie męczy mięśni pleców. | Ograniczona możliwość przewożenia pasażera. |
| Skuter | Dostosowany dla szerokiego przedziału wzrostowego ludzi. | Niska jakość wykonania elementów, które poprawiają wygodę jazdy (siedzisko, uchwyty). |

5. STANOWISKO ERGONOMICZNE

Stanowisko ergonomiczne zostało wykonane tak aby można było dokładnie zmierzyć odległości pomiędzy kolejnymi 3 punktami antropometrycznymi, czyli:

- Chwyć dłoni,
- Staw biodrowy,
- Podeszwy stóp.



Rys. 2. Usytuowanie mierzonych punktów antropometrycznych oraz ruchliwość par kinematycznych w stanowisku ergonomicznym

Zostały one wybrane ponieważ są to miejsca wyznaczające jednoznacznie miejsca podparcia kierowcy podczas użytkowania motocykla. Jako punkt bazowy zostały wyznaczone podeszwy stóp. Wynika to z faktu, że wysokość podnóżka była znana. Aby jak najskuteczniej i najszybciej móc regulować wysokość i odległość punktów podparcia do konstrukcji stanowiska ergonomicznego zostały użyte elementy ruchome, które oferują możliwość szybkiego przesuwania i blokowania par kinematycznych. Ruchliwość stanowiska została opracowana tak aby móc dowolnie przemieszczać siedzisko i kierownicę w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża i równoległą do długości motocykla. Rysunek 2 przedstawia usytuowanie mierzonych punktów antropometrycznych oraz ruchliwość par kinematycznych w stanowisku ergonomicznym.

6. WYNIKI POMIARÓW NA STANOWISKU ERGONOMICZNYM

Aby wyłonić możliwie najlepszą pozycję dla kierowcy 30 osób przystąpiło do badania. Były to osoby z zakresu od 5 centyla kobiet do 95 mężczyzn. Badani byli poproszeni o wskazanie najdogodniejszej pozycji, w której zechcieliby spędzić kolejne 5 godzin. Zostały zmierzone charakterystyczne odległości (patrz rysunek 2). Rysunek 3 przedstawia chmurę punktów uzyskaną przez naniesienie współrzędnych z pomiarów na stanowisku ergonomicznym.



Rys. 3. Chmura punktów naniesiona na wykres, niebieskie punkty wyznaczają położenie stawu biodrowego, czerwone natomiast to położenie uchwytu

Na podstawie chmury punktów została wyznaczona linia trendu dla położenia stawu biodrowego. Wyznacza ona przesuniętą o około 7 cm w osi Y linię styku pośladek z siedziskiem. Linia trendu wyznaczyła również optymalny kąt nachylenia siedziska,

który wynosi 16° . Na podstawie położenia chwytu wyznaczony został uśredniony punkt optymalnej pozycji rączki, powinna się ona znajdować 15 cm po X i 91 cm po Y od środka podnóżka.



Rys. 4. Zamodelowani kierowcy siedzący na wyznaczonym przez linię trendu siedzisku

Na podstawie uzyskanych wyników w wirtualnym środowisku został stworzony model ramy, który zgadza się z wyznaczonymi w badaniach ergonomii punktami. Rysunek 4 ukazuje zamodelowanych w wirtualnym środowisku komputerowym wspomagania projektowania kierowców. Dzięki specjalistycznemu narzędziu udało się dokonać oceny komfortu użytkownika. Zgodnie z przypuszczeniami okazało się, że zarówno 5 centyl kobiet jak i 95 mężczyzn może wygodnie siedzieć na zaprojektowanym LEM Napoli.

7. WNIOSKI NA TEMAT MOŻLIWYCH KIERUNKÓW ROZWOJU ERGONOMII W LEKKIM ELEKTRYCZNYM MOTOCYKLU

Badania wykazały, że spośród różnych typów jednośladów to motocykle turystyczne i skutery zapewniają największy komfort jazdy. Należy jednak zadbać o właściwe siedzisko, wykonane z dobrej jakości materiałów oraz o odpowiednim kształcie. Dzięki wykonaniu badań ergonomicznych na samym początku projektu i przed projektowaniem ramy udało się przystosować całość motocykla do fizycznych właściwości budowy człowieka. Właściwa postawa kierowcy przyczyni się do zwiększenia satysfakcji z jazdy oraz do poprawy bezpieczeństwa. Uwzględnienie dodatkowych założeń ergonomii przerodziło się w specjalnie zaprojektowaną ramę, która umożliwia szybkie wchodzenie i schodzenie z motocykla. Dla dostawców pizzy może to przełożyć się na bardziej efektywną pracę, a także na większy komfort pracy. W kolejnych latach planujemy rozszerzyć funkcjonalność stanowiska ergonomicznego o możliwość mierzenia szerokości rozstawienia nóg oraz kąta nachylenia rączek. Podczas analizy

wyników pomiarów członkowie Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych doszli do wniosku, że nie jest możliwe zaprojektowanie nieprzesuwnego siedziska, które byłoby wyprofilowane w sposób umożliwiający wygodne siedzenie osobom zarówno z 5, jak i 95 centyla ludzi. Z tego powodu w kolejnych latach zamierzamy stworzyć właściwie wyprofilowane przesuwne siedzisko. Umożliwi to każdemu użytkownikowi indywidualne dostosowanie jego położenia. Przesuw będzie realizowany przez przymocowanie siedziska do prowadnicy o kącie nachylenia zgodnym z kątem wyłonionym podczas badań ergonomii.

LITERATURA

- [1] WRÓBLEWSKA M., *Ergonomia*, Politechnika Opolska, Opole 2004.
- [2] TRZESNIEWSKI M., *Rennwagentchnik*, Vieweg+Teubner, 2008.
- [3] www.cycle-ergo.pl (dostęp: 21.05.2015).

Adam RESZEL*
Zbigniew ŻELAZNY*

SENSORY ULTRADŹWIĘKOWE DLA PIERWSZEGO POLSKIEGO POJAZDU AUTONOMICZNEGO. POMIARY I OCENA MOŻLIWOŚCI IMPLEMENTACJI

Artykuł poświęcony jest badaniom czujników ultradźwiękowych, które zostały przeprowadzone podczas prac nad Pierwszym Polskim Pojazdem Autonomicznym. Głównym celem tych analiz był dobór sensorów, które umożliwiłyby detekcję obiektów znajdujących się w najbliższym otoczeniu pojazdu. Niezbędne były badania dokładności i funkcjonalności czujników, przed podjęciem decyzji dotyczącej ich implementacji w pojeździe. Ze względu na ograniczenia związane z kosztem urządzeń, do badań wybrano dwa rodzaje czujników ultradźwiękowych: urządzenie SFR485WPR oraz MaxBotix 7040MB.

1. CZUJNIKI ULTRADŹWIĘKOWE – ZASADA DZIAŁANIA ORAZ PRZEDSTAWIENIE URZĄDZEŃ

Działanie czujników ultradźwiękowych oparte jest na wykorzystaniu fal dźwiękowych o wysokiej częstotliwości (ok. 40 kHz). Sensor musi być wyposażony w nadajnik oraz odbiornik fal ultradźwiękowych. Po wygenerowaniu fali następuje jej propagacja. Przeszkoda znajdująca się na drodze powoduje odbicie fali, która po upływie pewnego czasu powraca i jest wykrywana przez odbiornik znajdujący się w czujniku. Pomiar czasu pomiędzy nadaniem fali pierwotnej a detekcją fali odbitej umożliwia wyznaczenie odległości, na jakiej znajduje się przeszkoda, zgodnie ze wzorem:

$$s = \frac{Ct}{2}, \quad (1)$$

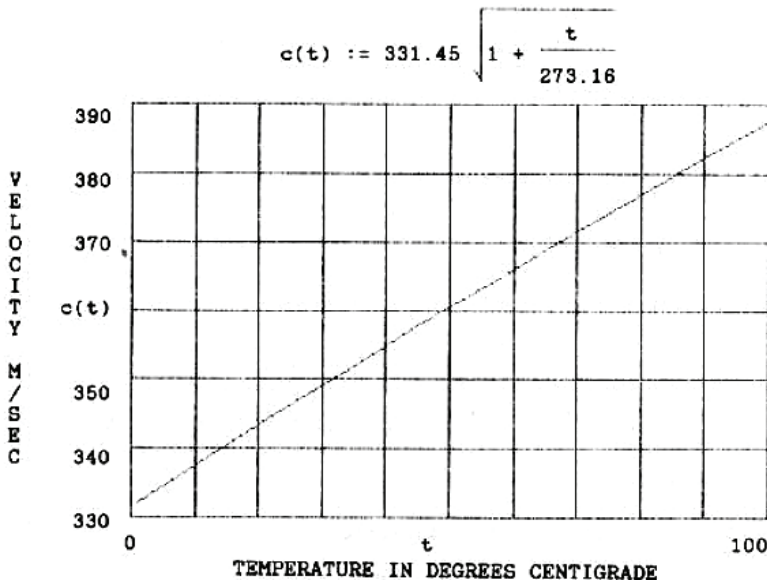
gdzie:

C – prędkość dźwięku ($C \approx 331,45$ m/s dla temp. 0 °C),
 t – czas pomiędzy falą wysłaną a odebraniem echa.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

Sensory ultradźwiękowe umożliwiają wykrywanie obiektów wykonanych z różnych materiałów, co znacznie zwiększa ich przydatność do wykorzystania w systemie detekcji bliskiego zasięgu. Ograniczeniem są w tym przypadku materiały o bardzo nieregularnym kształcie, który powoduje odbicia fali w różnych kierunkach i utrudnia odbiór echa.

Co istotne, prędkość propagacji fal dźwiękowych uzależniona jest od temperatury ośrodka, co może stać się przyczyną powstawania błędów podczas pomiaru. Niektóre sensory ultradźwiękowe wyposażone są w układ kompensacji błędów związanego z tym zjawiskiem. W wypadku jego braku, podczas projektowania układu opartego o takie czujniki, warto uwzględnić zależność prędkości dźwięku od temperatury.



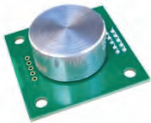
Rys. 1. Wykres zależności prędkości propagacji fali dźwiękowej od temperatury [2]

1.1. DEVANTECH SRF485WPR

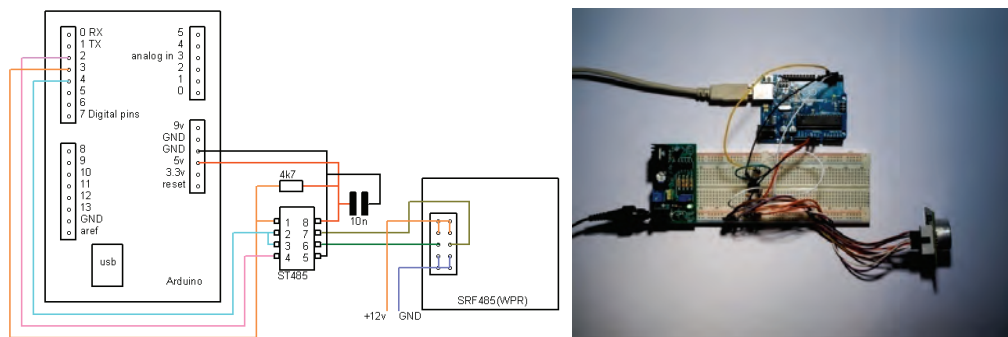
Pierwszy z badanych sensorów, model SRF485WPR, jest jednym z wielu dostępnych urządzeń oferowanych przez producenta, firmę Devantech. Został wybrany ze względu na fakt, iż jest on wyposażony w układ kompensacji temperatury oraz posiada osłonięty moduł nadajnika i odbiornika, dzięki czemu nie jest on narażony na warunki atmosferyczne. Niestety, cały czujnik dostarczany jest w postaci nieobudowanego układu, co należy uwzględnić w trakcie projektowania. Poniżej przedstawiono wybrane dane techniczne urządzenia.

Komunikacja z sensorem odbywa się za pośrednictwem protokołu RS485. Umożliwia on podłączenie 127 urządzeń do jednej magistrali. Poprawna praca układu wymaga zasilania 12 V prądem stałym.

Tabela 1. Dane techniczne czujnika Devantech SRF485WPR [3]

| | |
|------------------------------|---|
| Devantech SRF485 WPR |  |
| Zasięg | 0,6–5 m |
| Częstotliwość wysyłanej fali | 40 kHz |
| Dokładność | ~30 mm |
| Kąt widzenia | ~55° |
| Zakres temperatur | od –30 °C do +50 °C |
| Interfejs komunikacyjny | RS485 |
| Czas pomiaru | 100 ms |
| Zasilanie | 12 V/10 mA |
| Wymiary | 40,5 mm × 40,5 mm; średnica przetw.: 25 mm |
| Cena | ok. 125 PLN |

Podłączenie sensora do komputera PC, w celu akwizycji danych, wymagało wykonania prostego układu elektronicznego. W jego skład wchodzi: sensor SRF 485WPR, układ uruchomieniowy Arduino UNO R3 z mikrokontrolerem Atmega 328, układ scalony MAX485, rezystor 4,7 kΩ, kondensator 10 nF oraz przewody połączeniowe. Układ ten zbudowano z wykorzystaniem płytki prototypowej, umożliwiającej połączenie elementów bez konieczności lutowania ich ze sobą. Do zasilania sensora wykorzystano zasilacz płytek stykowych AVT 3072. Schemat układu wraz z wykonaniem przy użyciu płytki prototypowej pokazano na rys. 2.




Rys. 2. Schemat [3] i fotografia układu z czujnikiem SRF485WPR

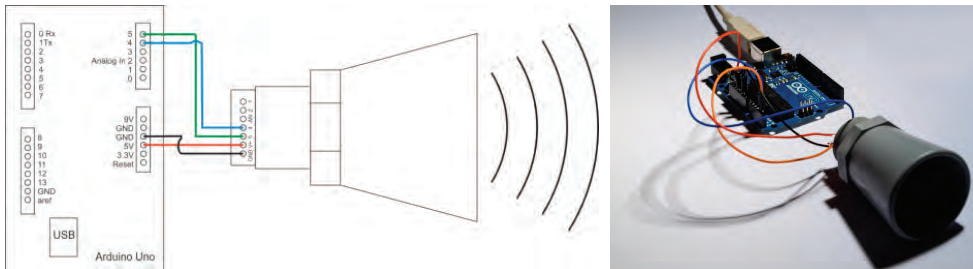
1.2. MAXBOTIX MB7040

Drugim czujnikiem, poddanym badaniom było urządzenie firmy MaxBotix. Jest to również sensor ultradźwiękowy, jest on jednak zbudowany w sposób, zapewniający całkowitą odporność na czynniki zewnętrzne, takie jak woda czy pył. Posiada możliwość programowego ustawienia częstotliwości pomiaru do 40 Hz, jednakże optymalną wartością podawaną przez producenta jest 10 Hz.

Tabela 2. Dane techniczne czujnika MaxBotix MB7040 [4]

| | |
|------------------------------|---|
| MaxBotix MB7040 |  |
| Zasięg | 0,20–7,65 m |
| Częstotliwość wysyłanej fali | 42 kHz |
| Dokładność | ~10 mm |
| Zakres temperatur | od -45 °C do +60 °C |
| Interfejs komunikacyjny | I2C |
| Czas pomiaru | 25 ms (zalecane 100 ms) |
| Zasilanie | 5V/4,4 mA |
| Wymiary | długość: 65,1 mm, średnica: 43,8 mm |
| Cena | 350 PLN |

W celu odebrania danych o pomiarze odległości, sensor ten został podłączony do układu Arduino, ten zaś do komputera PC. Do poprawnej pracy czujnik wymaga napięcia 5 V, które uzyskać można po podłączeniu do komputera, bez konieczności zapewniania zewnętrznego źródła zasilania. Sposób podłączenia jest bardzo prosty, jego schemat wraz z realizacją przedstawiono na rys. 3.



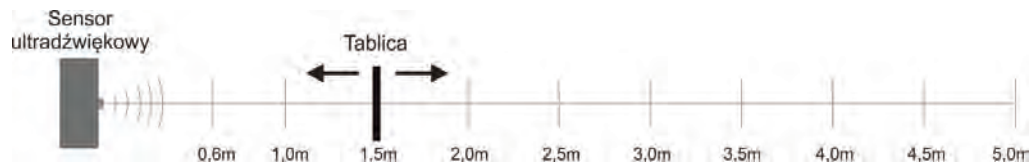
Rys. 3. Schemat połączenia sensora MaxBotix MB7040

2. PROCEDURA POMIAROWA

Badania czujników ultradźwiękowych zostały przeprowadzone poprzez szereg pomiarów statycznych oraz dynamicznych. Odbływały się one przy takich samych warunkach dla obu sensorów. Wszystkie pomiary przeprowadzono przy częstotliwości 10 Hz. Umożliwiło to następnie bezpośrednie porównanie obu urządzeń.

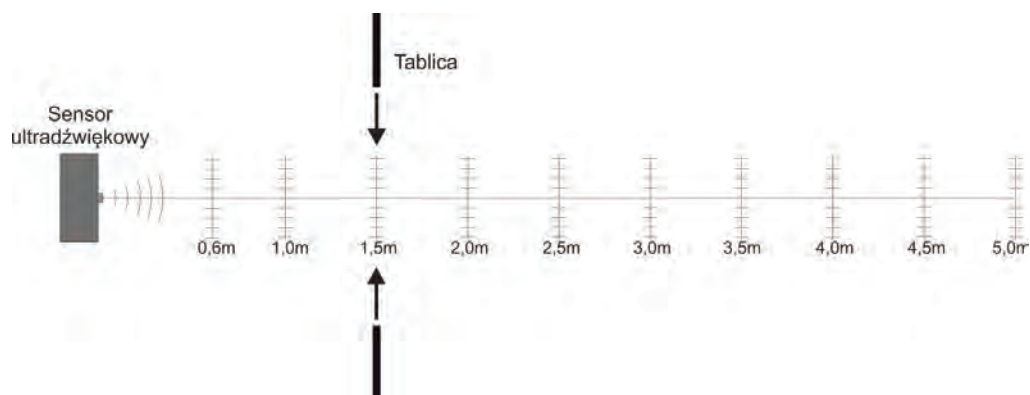
Pierwszy pomiar przeprowadzono w celu weryfikacji dokładności czujnika. W tym celu wzdłuż jego osi symetrii ustawiono przedmiot – tablicę o wymiarach 100 × 150 cm, wykonaną z tworzywa sztucznego, który oddalano od sensora w celu odczytu wskazań i porównania z rzeczywistą odległością. Rozmiary tablicy umożliwiają symulowanie

gabarytów pojazdu, do którego zbliża się sensor. Pomiar zrealizowano w zamkniętym pomieszczeniu, temperatura wynosiła 22°C. Był on wykonywany co 0,5 metra, aż do odległości 5 metrów.



Rys. 4. Procedura pomiarowa – pomiar prostopadły

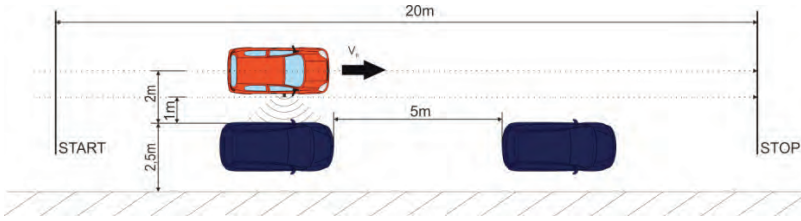
Kolejny pomiar przeprowadzono w celu sprawdzenia rzeczywistego kąta widzenia czujnika. Jest to niezwykle ważny parametr, z punktu widzenia realizacji pomiaru podczas ruchu pojazdu, równoległe do wykrywanych obiektów. Na rysunku 5 przedstawiono sposób realizacji pomiaru.



Rys. 5. Procedura pomiarowa – pomiar równoległy

Ostatnim etapem badań były pomiary dynamiczne, w których sensor przymocowany był do poruszającego się pojazdu, przejeżdżającego obok samochodów stojących równoległe do toru jazdy. Pomiedzy nimi pozostawiono przestrzeń o szerokości 5 metrów. Dzięki temu możliwe było zbadanie sensorów pod kątem detekcji obiektów, które w sposób ciągły poruszają się względem czujników zaburzając tor echa fali ultradźwiękowej. Pomiary odbywały się przy temperaturze 2 °C na otwartej przestrzeni. Schemat procedury pomiarowej przedstawia rys. 6.

Dzięki pomiarom dynamicznym możliwa jest ocena przydatności sensorów do wyznaczania odległości pomiędzy obiektami, podczas jazdy po torze prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.



Rys. 6. Schemat procedury pomiaru dynamicznego

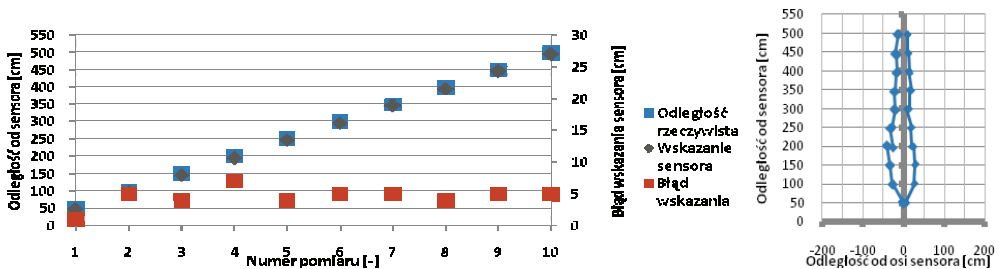


Rys. 7. Realizacja pomiaru dynamicznego oraz wizualizacja miejsca zamocowania czujnika

Czujnik, na potrzeby testów, został tymczasowo zamontowany po prawej stronie samochodu, na wysokości 80 cm nad ziemią. Dzięki temu możliwe było również przetestowanie w tych samych warunkach dwóch czujników, ze względu na prosty demontaż i zamianę sensorów. Miejsce zamocowania sensora obrazuje poglądowo rysunek 7.

3. WYNIKI POMIARÓW

3.1. DEVANTECH SRF485WPR



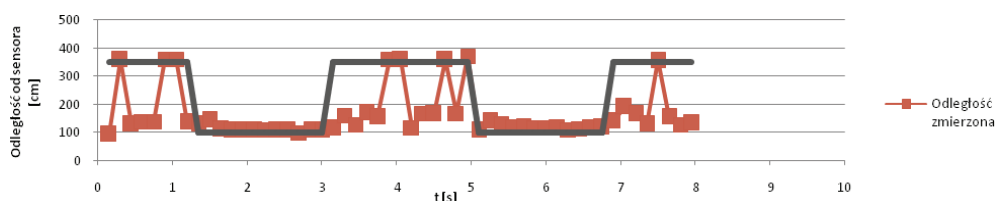
Rys. 8. Wskazania czujnika SRF485WPR– pomiar prostokąta (z lewej strony) oraz pole detekcji (z prawej strony)

Wykres, obrazujący wyniki pomiaru prostopadłego, wskazuje na dobrą dokładność czujnika w tych warunkach. Największy błąd, wynoszący 7 cm odchylenia od wartości rzeczywistej, jest akceptowalny, zważywszy na zasadę działania czujnika oraz jego relatywnie niski koszt.

Uzyskany obszar detekcji jest wąski i nie zmienia się znacząco wraz ze wzrostem odległości od czoła sensora. Nieznaczne błędy widoczne na wykresie spowodowane były odchyleniami od prostopadłości tablicy do osi sensora, nie wpływają jednak na zaburzenie obrazu rzeczywistego pola widzenia czujnika SRF 485WPR.

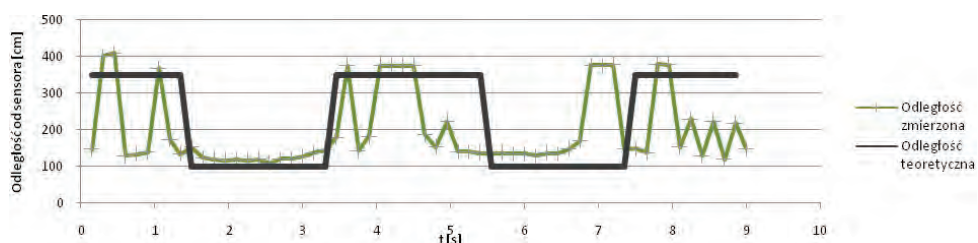
Następnie przeprowadzono pomiary dynamiczne, których wyniki zamieszczono poniżej.

Pomiar 1. Czas przejazdu: 7,96 s, prędkość przejazdu: 2,51 m/s, odległość: 1 m.



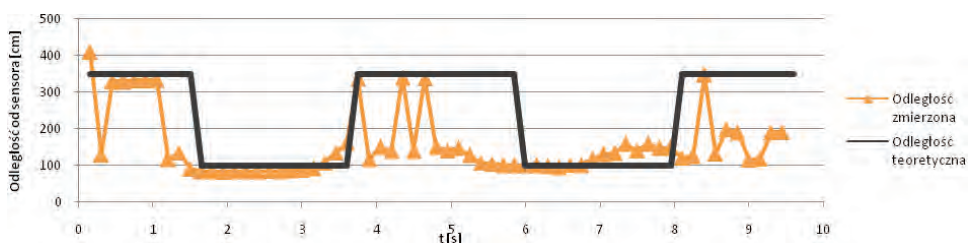
Rys. 9. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – pomiar 1

Pomiar 2. Czas przejazdu: 8,80 s, prędkość przejazdu: 2,27 m/s, odległość: 1 m.



Rys. 10. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – pomiar 2

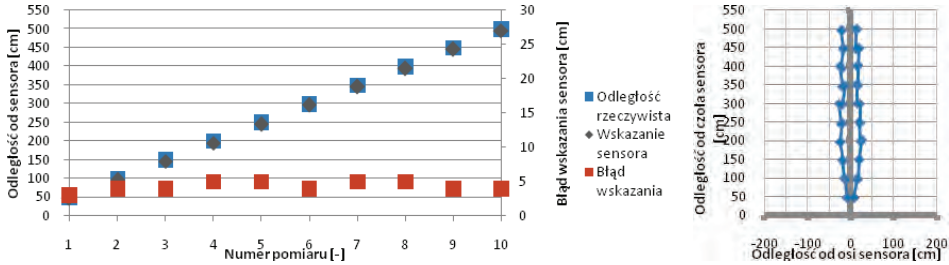
Pomiar 3. Czas przejazdu: 9,52 s, prędkość przejazdu: 2,10 m/s, odległość: 1 m.



Rys. 11. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – pomiar 3

Wyniki pomiarów dynamicznych w przypadku tego czujnika są niezadowalające. Rozróżnienie obszarów, w których czujnik powinien wykrywać stojący pojazd, jest niemal niemożliwe.

3.2. MAXBOTIX MB7040

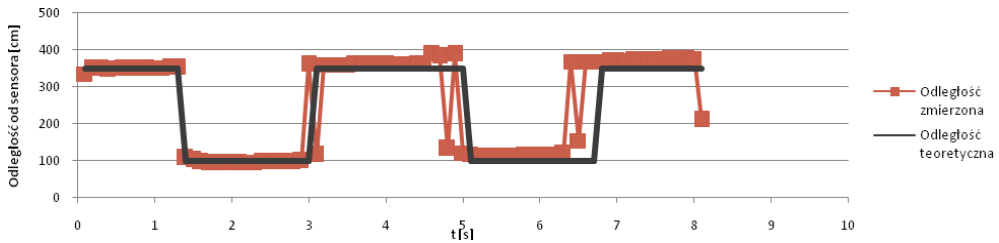


Rys. 12. Wskazania czujnika MaxBotix MB7040 - pomiar prostopadły

Pomiar prostopadły wykazał dobrą dokładność sensora firmy MaxBotix, błąd wskazania nie przekroczył 5 cm. Pole detekcji jest węższe niż w przypadku poprzedniego czujnika i bardzo zbliżone do danych udostępnionych przez producenta.

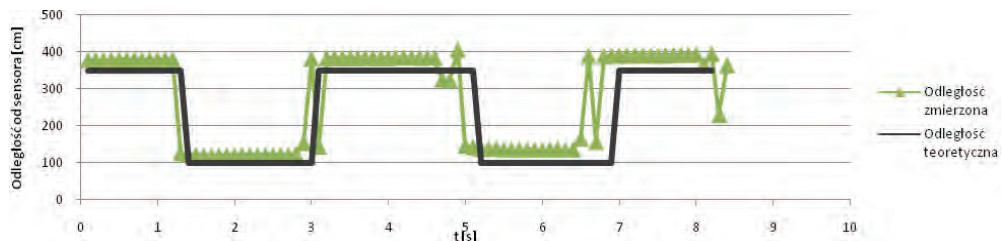
Kolejnym krokiem, podobnie jak w przypadku pierwszego czujnika, było przeprowadzenie pomiarów dynamicznych.

Pomiar 1. Czas przejazdu: 8,05 s, prędkość przejazdu: 2,48 m/s, odległość: 1 m.



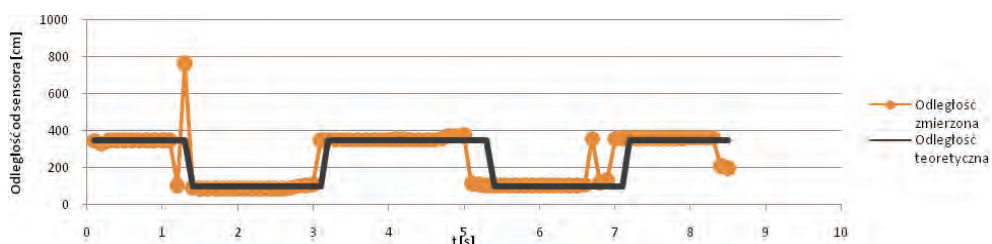
Rys. 13. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – MaxBotix pomiar 1

Pomiar 2. Czas przejazdu: 8,20 s, prędkość przejazdu: 2,44 m/s, odległość: 1 m.



Rys. 14. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – MaxBotix pomiar 2

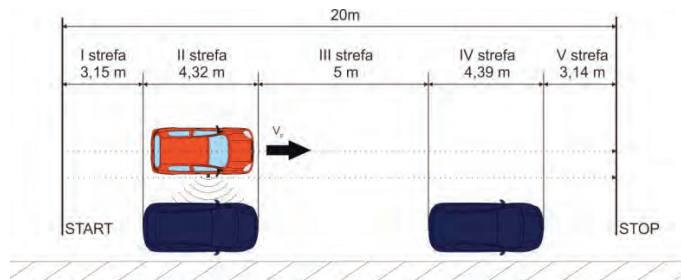
Pomiar 3. Czas przejazdu: 8,42 s, prędkość przejazdu: 2,37 m/s, odległość: 1 m.



Rys. 15. Odległości zmierzone wraz z wartościami teoretycznymi – MaxBotix pomiar 3

Drugi z czujników dostarczył znacznie dokładniejsze wyniki pomiarów. Pozwoliły one następnie na dokonanie analizy wykrytych przeszkód oraz przestrzeni pomiędzy nimi, pod kątem ich wymiaru wzdłużnego.

Tor pomiarowy podzielono na 5 stref: pierwsza strefa to obszar od linii początku toru do pierwszego samochodu, druga strefa to pierwszy samochód, trzecia strefa jest przestrzenią pomiędzy stojącymi pojazdami, strefa czwarta to drugi samochód, a obszar za drugim pojazdem to strefa piąta.



Rys. 16. Podział trasy przejazdu na pięć stref

Dzięki temu podziałowi, możliwa jest interpretacja wyników pomiarów poprzez obliczenie długości stref. Zrealizowano to poprzez odczytanie, z wykresów pomiarów od 1 do 3, czasu trwania poszczególnych etapów w trakcie każdego pomiaru. Znając prędkość pojazdu możliwe stało się obliczenie wymiarów stref wzdłuż trajektorii ruchu pojazdu. Czasy przejazdu zmierzono podczas każdego pomiaru.

Znając obliczone wartości, oraz rzeczywiste wymiary stref, obliczono także błędy, wynikające z niedokładności wskazań sensora. Uzyskano je poprzez odjęcie od obliczonych długości każdej strefy wymiaru rzeczywistego. Wartości błędów z minusem oznaczają, że obliczona długość ma mniejszą wartość od wartości rzeczywistej. Zaś z plusem, według obliczeń, strefa jest dłuższa niż w rzeczywistości.

Tabela 3. Wyniki obliczeń długości stref na podstawie pomiarów

| Nr pomiaru | Czas przejazdu [s] | Prędkość przejazdu [m/s] | Strefa I | | Strefa II | | Strefa III | | Strefa IV | | Strefa V | |
|------------|--------------------|--------------------------|----------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------|----------|------------|
| | | | Czas [s] | Wymiar [m] | Czas [s] | Wymiar [m] | Czas [s] | Wymiar [m] | Czas [s] | Wymiar [m] | Czas [s] | Wymiar [m] |
| 1 | 8,05 | 2,48 | 1,30 | 3,22 | 1,80 | 4,46 | 1,70 | 4,22 | 1,80 | 4,46 | 1,50 | 3,72 |
| 2 | 8,20 | 2,44 | 1,20 | 2,93 | 1,90 | 4,64 | 1,80 | 4,39 | 1,80 | 4,39 | 1,50 | 3,66 |
| 3 | 8,42 | 2,37 | 1,20 | 2,84 | 1,80 | 4,27 | 2,00 | 4,74 | 1,90 | 4,50 | 1,50 | 3,55 |

Tabela 4. Błędy wymiarów stref względem wartości rzeczywistych

| Nr pomiaru | Błąd względem wymiarów rzeczywistych [m] | | | | |
|------------|--|-----------|------------|-----------|----------|
| | Strefa I | Strefa II | Strefa III | Strefa IV | Strefa V |
| 1 | 0,07 | 0,14 | -0,78 | 0,07 | 0,58 |
| 2 | -0,22 | 0,32 | -0,61 | 0,00 | 0,52 |
| 3 | -0,31 | -0,05 | -0,26 | 0,11 | 0,42 |

Analiza błędów obliczonych wymiarów względem wartości rzeczywistych pokazuje, że wskazania sensora MaxBotix MB7040 mogą służyć do przeliczania odległości wolnej przestrzeni parkingowej, zwłaszcza że żaden z pomiarów nie wykazał szerokości tego obszaru powyżej jego rzeczywistego wymiaru. Dzięki temu uzyskano pewność, że nie występuje zagrożenie podjęcia decyzji o odpowiedniej ilości miejsca w sytuacji, gdy w rzeczywistości jest go mniej. W celu zwiększenia dokładności pomiarów konieczne jest zmniejszenie prędkości przejazdu. Oszacowano, że dla prędkości poniżej 2 m/s, wskazania odległości pochodzące z tego czujnika będą wystarczające do zastosowania w parkowaniu równoległym.

Badania sensora MaxBotix MB7040 pozwoliły na ocenę jego dokładności oraz przydatności w systemie sensorów pojazdu autonomicznego. Okazał się on być bardzo dobrym rozwiązaniem, umożliwiającym pomiary odległości do obiektów poruszających się nie tylko wzdłuż jego osi, lecz również w kierunku prostopadłym do niej.

4. WNIOSKI

Ostateczne porównanie czujników SRF 485WPR oraz MaxBotix MB7040 wskazuje na znaczną przewagę drugiego urządzenia, szczególnie w przypadku przeprowadzonych pomiarów dynamicznych. Sensor SRF 485WPR jest również odpowiednio dokładny przy realizacji pomiarów odległości do obiektów znajdujących się na jego osi lub poruszających się wzdłuż niej. Świadczy to o tym, że najlepszym miejscem montażu tych czujników jest przednia i tylna część pojazdu, oraz detekcja obiektów bezpośrednio przed i za nim. Wskazania odległości sensora MaxBotix podczas pomiarów dynamicznych okazały się być na tyle dokładne, iż urządzenie to może znaleźć się na bocznej płaszczyźnie pojazdu, realizując pomiar dystansu do obiektów poruszających się prostopadle do jego osi.

LITERATURA

- [1] RESZEL A., *Projekt koncepcyjny doboru sensorów w mechatronicznym pojeździe autonomicznym*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2013.
- [2] BOHN D.A., *Environmental Effects on the Speed of Sound*, Journal of the Audio Engineering Society, 1988, 36(4).
- [3] SRF485WPR Ultrasonic Rangefinder Technical Specification, [online], <http://www.robot-electronics.co.uk/html/srf485wprtech.htm>, (dostęp: 04.05.2014).
- [4] MaxBotix MB7040 Datasheet, (online), http://www.maxbotix.com/documents/I2CXL-MaxSonar-WR_Datasheet.pdf, (dostęp: 04.05.2014).

*konstrukcja wymienników,
pojazd zeroemisyjny,
kriogenika, pneumatyka,
rotacyjna maszyna łopatkowa*

Adam Tomasz POREBSKI*

ROZWÓJ KONSTRUKCJI WYMIENNIKA CIEPŁA DLA KRIONGINE – POJAZDU ZEROEMISYJNEGO NAPĘDZANEGO PARAMI UZYSKANymi NA SKUTEK ODPAROWANIA CIEKŁYCH GAZÓW

Poniższy artykuł porusza temat wymienników ciepła zastosowanych w pierwszym prototypie zero-emisyjnego pojazdu napędzanego odparowany azotem oraz koncepcji wymienników mających zapewnić wzrost sprawności napędu w kolejnych odsłonach układu zastosowanego w pojeździe krioNgine. Omówiono założenia teoretyczne, zasadę działania i rozwiązania konstrukcyjne tych wymienników. Ponadto przedstawiono wyniki pomiarów temperatury uzyskane przy zastosowanych już w pojeździe układów odparowania azotu.

1. WSTĘP

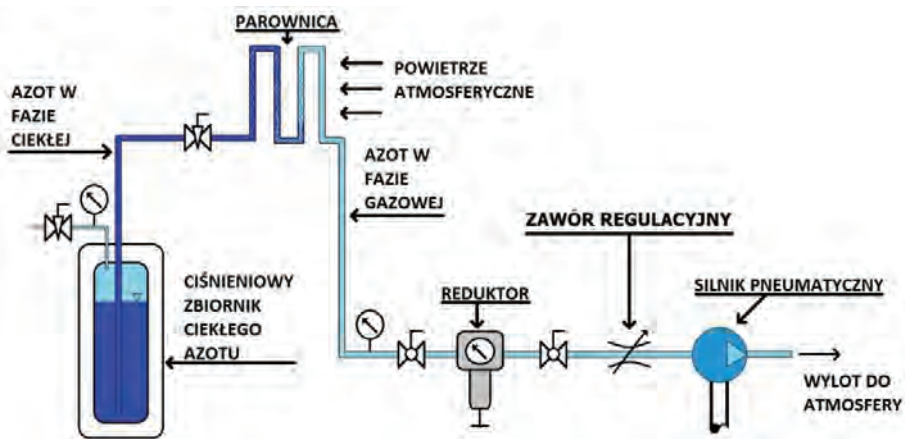
KrioNgine (rys. 1) jest pierwszym w Polsce oraz Unii Europejskiej pojazdem wykorzystującym skroplony azot jako nośnik energii. Powstał on w ramach prac badawczo-naukowych członków Koła Naukowego „Skrzyneczka”, działającego przy Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Podstawowym celem projektu krioNgine jest badanie, rozwój i optymalizacja zero emisyjnego napędu przyjaznego środowisku naturalnemu. W dalszej perspektywie planuje się promocje ekonapędu w motoryzacji powszechnej (samochody), przemysłowej (transport wewnętrzny i spedycja regionalna) oraz w przemyśle jako napęd maszyn i urządzeń w newralgicznych punktach obiektów przemysłowych, gdzie występuje dużo ciepła.

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Koło Naukowe Skrzyneczka, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław (+48) 693-461-350, e-mail: skrzyneczka@pwr.wroc.pl



Rys. 1. Pojazd krioNginie

Na obecnym etapie projekt krioNginie jest modelem badawczo-dydaktycznym umożliwiającym zarówno prowadzenie prac rozwojowych, jak i dydaktycznych. Studenci zainteresowani przyjaznymi środowisku napędami mogą osobiście poznać technologię, która wczoraj była teorią, dziś modelem, a jutro być może dostępna dla każdego.



Rys. 2. Schemat instalacji napędu krioNginie – wersja aktualna

2. NAPĘD OPARTY NA CIEKŁYM AZOCIE

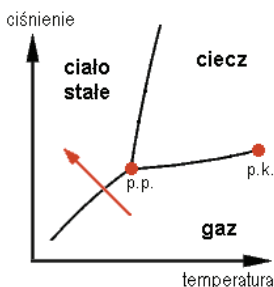
Napęd pojazdu krioNginie jest analogicznym urządzeniem do maszyny parowej Watta. Zasadniczo jednak różni się medium roboczym, źródłem ciepła oraz silnikiem.

Maszyna parowa Watta jako medium robocze wykorzystuje wodę, natomiast źródłem ciepła niezbędnego do jej odparowania (ok. 100 °C) jest spalane paliwo. Wiąże się to najczęściej z emisją do atmosfery zanieczyszczeń w postaci spalin. Można oczywiście poszukiwać innych źródeł ciepła, jak np. reaktor atomowy czy słońce, jednak te źródła ciepła komplikują instalacje. W napędzie krioNginie (rys. 1) medium roboczym jest skroplony azot. Ta ciecz przy ciśnieniu atmosferycznym wrze w temperaturze ok. –180 °C. Pozwala to na jej odparowanie przy wykorzystaniu ciepła pobieranego z otoczenia. Dzięki temu poza azotem, który stanowi 78% składu powietrza atmosferycznego, nie są emitowane żadne inne gazy czy zanieczyszczenia. W niektórych obiektach przemysłowych można wykorzystywać korzystny efekt chłodniczy. Ponadto maszyny Watta były konstruowane w oparciu o silniki tłokowe, natomiast w krioNginie zastosowano pneumatyczny silnik łopatkowy.

3. WYMIENNIK CIEKŁY AZOT – POWIETRZE

Szczególnym elementem układu napędowego w krioNginie jest wymiennik, w którym azot przechodzi ze stanu ciekłego do lotnego. Temperatura odparowania azotu pozwala wyeliminować dodatkowe źródła ciepła, ale niesie ze sobą problemy eksploatacyjne wymiennika.

Odparowujący azot (rys. 3) powoduje znaczne oziębienie powierzchni wymiennika, co pociąga za sobą jej oszranianie, zależne od wilgotności oraz temperatury otoczenia. Mamy wówczas do czynienia ze zjawiskiem resublimacji wody (przejścia ze stanu lotnego do stałego). Ma to zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na sprawność wymiany ciepła. Pojawiający się na powierzchni parowacza szron pozwala na wykorzystanie ciepła utajonego przemiany fazowej, co przyczynia się do znacznej poprawy sprawności wymiennika. Przemiana resublimacji polega na bezpośrednim przejściu ze stanu lotnego w stały w sytuacji, gdy temperatura punktu rosy osiągnie wartość niższą od temperatury zamarzania.



Rys. 3. Wykres przemian fazowych (Źródło: Wikipedia)

Ciepło (rys. 4) pozyskane z 1 kg pary wodnej dla tej przemiany wynosi:

$$Q_{\text{res}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (s_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{H}_2\text{O}}) = 1 \cdot (333,7 + 2256) = 2589,7 \text{ kJ}$$

gdzie:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – masa pary wodnej, kg,

$s_{\text{H}_2\text{O}}, r_{\text{H}_2\text{O}}$ – ciepło topnienia i parowania wody, kJ/kg .

Dla porównania, ciepło pozyskane z 1 kg powietrza przy temperaturze otoczenia ok. 17°C wynosi:

$$Q_{\text{pow}} = m_{\text{pow}} \cdot c_{p,\text{pow}} \cdot \Delta T = 1 \cdot 1,224 \cdot 180 = 220,32 \text{ kJ}$$

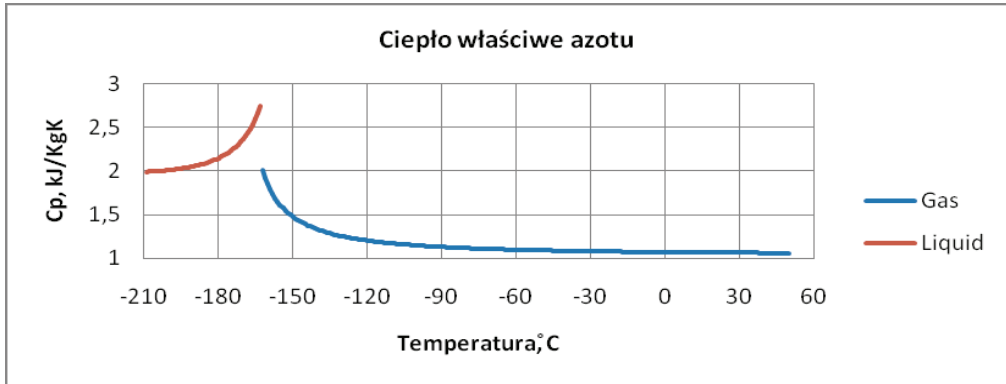
gdzie:

m_{pow} – masa powietrza kg,

$c_{p,\text{pow}}$ – ciepło właściwe powietrza $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$,

ΔT – różnica temperatur powietrza (17°C) i płynnego azotu w zbiorniku (dla $p = 15 \text{ bar}$, $t = -162,7^\circ\text{C}$).

Ciepło parowania azotu wynosi $r_n = 199 \text{ kJ/kg}$, natomiast ciepło właściwe (rys. 4) $c_{p,N} = 1,06 \div 2,1 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$.



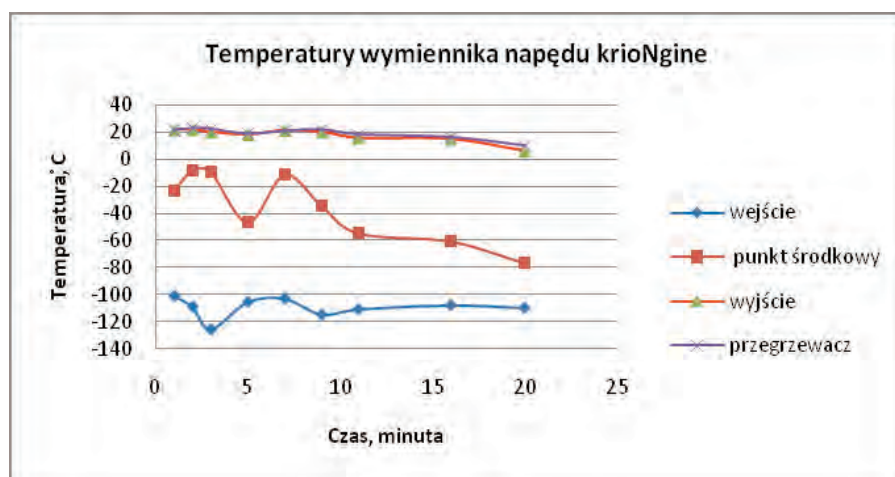
Rys. 4. Ciepło właściwe azotu w zależności od temperatury

Ponadjedenaścrotkrotna różnica znacznie zwiększa wydajność wymiennika.

Problem pojawia się w momencie, gdy grubość warstwy szronu przekroczy wartość, przy której strumień przekazywanego ciepła z przemiany resublimacji oraz pobieranego z powietrza jest blokowany przez opór cieplny lodu (który tworzy szron) w takim stopniu, który uniemożliwia skuteczne odparowanie płynnego i przegrzewanie lotnego azotu. Skutkiem tego temperatura par azotu dostarczanego do silnika zaczyna spadać do wartości, poniżej której pojawiają się zakłócenia pracy urządzeń wchodzących w skład instalacji (np.: zawór regulacyjny, reduktor ciśnienia) Z doświadczeń wynika, że dzieje się tak przy temperaturze otoczenia poniżej 10°C .

Instalacja pojazdu napędzanego ciekłym azotem musi pracować pod zmiennym obciążeniem, co przyczynia się do znacznego pogorszenia się możliwości układu napędowego w wyniku oblodzenia wymiennika. Gdy wymiennik nie jest obciążony, szron zaczyna topnieć. Ponowne obciążenie termiczne powoduje zamazanie skropionej wody, w wyniku czego powstaje lodowa warstwa izolacyjna pogarszająca znacznie wydajność wymiany ciepła.

Obecny układ składa się z trójdrogowego kolektorowego wymiennika harfowo-wężownicowego, w którym następuje odparowanie ciekłego azotu oraz spiralnego wymiennika pełniącego funkcję przegrzewacza. Cała instalacja odparowania i przegrzewu azotu wykonana jest z miedzi rekrytalizowanej. System ten został przebadany pod kątem temperatury (na wejściu do wymiennika, w połowie jego długości, wyjściu oraz na przegrzewaczu) (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład temperatury wymiennika w czasie

Z powyższego wykresu wynika, że w początkowej fazie działania wymiennika temperatury na wejściu, jak i po środku spadają, by po kilku minutach wzrosnąć do wartości wyjściowych. Obrazuje to potencjał, jaki niesie ze sobą ciepło utajone resublimacji. Pojawienie się szronu wspomaga ogrzewanie azotu, jednak wykres przedstawiający temperatury punktu środkowego wymiennika pokazuje, że nadmierny przyrost szronu zaczyna utrudniać przekazywanie ciepła. Z kolei wykres temperatury na wejściu do wymiennika wskazuje, że przydużej różnicy temperatur przyrastający szron stanowi zdecydowanie mniejszy problem niż tam, gdzie różnica temperatury jest mniejsza.

Na podstawie wyników pomiarów można wywnioskować, że układ harfowo-wężownicowy o dłuższych pionowych odcinkach spełnia doskonale swoją funkcję, spowalniając przedostawanie się płynnej fazy azotu przez ten wymiennik. Dzieje się tak gdyż na fazę płynną azotu oddziałuje siła grawitacji redukująca prędkość poruszania się kropeł w górę. Podobny efekt wykorzystywany jest w energetycznych kotłach

parowych. Woda podgrzewana w rurach wymienników ekranowych kotła jest doprowadzana od dołu. Pozwala to na grawitacyjną separację wody i pary wodnej. W kotłach nadkrytycznych sprawność tego procesu jest na tyle duża, że nie ma potrzeby stosować dodatkowego separatora w postaci walczaka.

W przemyśle do odparowania skroplonych gazów wykorzystuje się pionowe wymienniki dużej wysokości (kilka metrów) z wykorzystaniem ciepła utajonego przemiany resublimacji. Kilka baterii takich wymienników połączonych w układ równoległy pozwala odstawiać zaszczone parowacze i umożliwia im samoczynne oczyszczanie się ze szronu. W tym samym czasie w kolejnej baterii proces odparowania zaczyna się od nowa, co pozwala na utrzymanie ciągłości dostaw par gazu.

Dokładne ustalenie tego, co dzieje się wewnątrz wymiennika przy przemianie fazowej jest trudne, jednak obserwując postęp oszraniania armatury można oszacować miejsce, do którego dociera znacząca ilość nieodparowanego jeszcze gazu. Pomocną jest tu też technika termowizyjna, która pozwala monitorować rozkład temperatur.

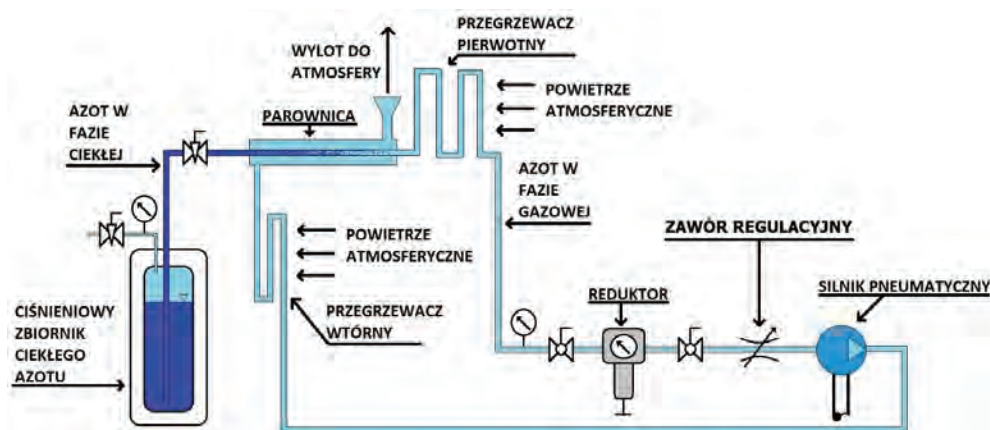


Rys. 6. Obraz wymiennika wykonany kamerą termowizyjną

4. MODERNIZACJA UKŁADU ODPAROWANIA CIEKŁEGO AZOTU

W trakcie eksploatacji pojazdu krioNginie zaobserwowano (rys. 6), że po dłuższym użytkowaniu wymiennika bez przerw na oszranianie, układ zwiększa swoją bezwładność, a to wpływa niekorzystnie na kontrolowanie ilości odparowywanego gazu. Z uwagi na to postanowiono w przyszłości wzbogacić układ o element (lub elementy), który pozwoli na sprawne odparowanie ciekłego azotu w całości, a resztę instalacji wykorzystać do ogrzewania par przez pobieranie ciepła z otoczenia. Jednym z takich elementów może być wymiennik typu „rura w rurze” lub wymiennik przeponowy, przy czym ciepło potrzebne na odparowanie azotu pobierane byłoby z gazu opuszczającego silnik pneumatyczny. Lotny azot odbierany z silnika mógłby jednak mieć za niską temperaturę (rozprężanie w silniku powoduje jej spadek) do skutecznego pod-

grzewania skroplin azotu, dlatego na drodze gazu pomiędzy silnikiem a parowaczem powinien znaleźć się wtórny przegrzewacz podnoszący jego parametry. Kompletny układ koncepcji drugiej przedstawia rys. 7.



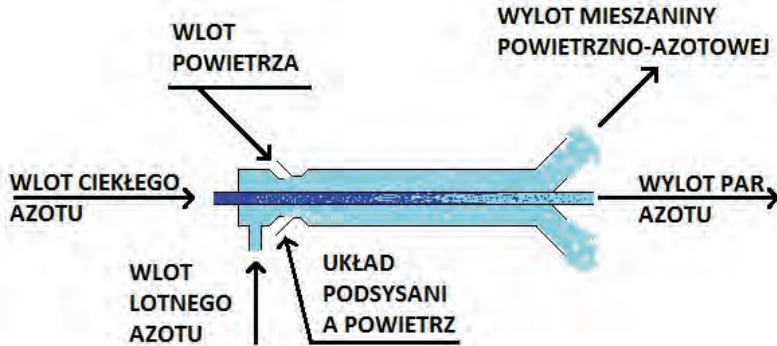
Rys. 7. Schemat instalacji napędu krioNginie po modyfikacjach

Wzrastający stopień złożoności instalacji oraz ilość jej elementów wiąże się ze wzrostem strat wynikających z oporu przepływu gazu przez armaturę oraz masy ogólnej instalacji. O ile w sekcji wysokociśnieniowej, czyli przed silnikiem, nie jest to poważny problem, o tyle za nim jakiegokolwiek opory przepływu będą powodowały spadek różnicy ciśnień przed i za silnikiem, a co za tym idzie spadek jego mocy. Dobierając armaturę do układu za silnikiem należy możliwie jak najbardziej zmniejszyć prędkości gazu. Niskie ciśnienie nie stanowi tu już problemów konstrukcyjnych, dlatego można zastosować miedziane rury cienkościenne, pozwalające zachować jednak sztywność konstrukcyjną instalacji. Ponadto obecny wymiennik zamontowany jest na dachu pojazdu (rys. 1), przez co jako stanowisko dydaktyczne pełni swoją funkcję doskonale, jednak z uwagi na estetykę, bezpieczeństwo i wydajność planuje się w przyszłości wkomponowanie parowacza i przegrzewaczy w bryłę pojazdu tak, aby wykorzystać zjawiska aerodynamiki do zwiększenia strumienia powietrza opływającego układ.

Dodatkową zaletą układu przedstawionego na rys. 2 jest efekt „podsysania” gazu w części za silnikiem dzięki jego schładzaniu w parowaczu. Przy prawidłowo dobranej armaturze (włączenie w instalację dyfuzora) powinno to zrównoważyć opory przepływu gazu za silnikiem, a w sprzyjających warunkach nawet podnieść sprawność całego układu.

Innym rozwiązaniem usprawniającym działanie napędu krioNginie jest możliwość wykorzystania w parowniku ciepła utajonego resublimacji. Oczywiście wymagałoby to modyfikacji konstrukcji wymiennika tak, aby azot był mieszany z powietrzem atmosferycznym, co pozwalałoby na dostarczenie wilgoci niezbędnej do zaistnienia zjawiska resublimacji (rys. 8). Zmienny wydatek mieszaniny gazowej wprowadzanej

do wymiennika powodowałyby „wydmuchiwanie” nadmiaru nagromadzonego szronu, co pozwoliłoby na utrzymywanie stabilnej sprawności działania wymiennika.



Rys. 8. Wymiennik z układem podsysania powietrza

Powyżej przedstawione pomysły na polepszenie sprawności układu wymiany ciepła napędu krioNginie to tylko ogólny zarys stanowiący bazę do dalszych badań i poszukiwań korzystniejszych rozwiązań konstrukcyjnych. Idea wykorzystania skroplonego gazu do napędu maszyny parowej (lub pneumatycznej) jest bardzo atrakcyjna ze względu na ekologię, ale także na specyfikę działania układu w miejscach gdzie spaliny przeszkadzają, a efekt chłodniczy jest wręcz pożądany.

LITERATURA

- [1] RESZEWSKI S., KOWALSKI A., *Resublimacja jako źródło ciepła*, *Hydraulika i Pneumatyka*, 2011, nr 1, 24–28.
- [2] RESZEWSKI S., *Pompa ciepła Eko-HEAT*, Promont 2011, Świebodzice.
- [3] RESZEWSKI S., *EKO-HEAT – Pompy ciepła wykorzystujące przemiany fazowe wody w ogrzewaniu*, *InstalReporter*, 9/2012.
- [4] ALBERS J., DOMMEL R., MONTALDO-VENTSAM H., NEDO H., ÜBELACKER, WAGNER, *Systemy centralnego ogrzewania i wentylacji. Poradnik dla projektantów i instalatorów*, WNT, Warszawa 2007.

Janusz ROGULA*
Mateusz MICHALAK*

NACZEPA DO PRZEWOZU ŻYWEGO DROBIU – KONSTRUKCJA Z MOŻLIWOŚCIĄ ODZYSKU ENERGII HAMOWANIA

Poniższy artykuł porusza ważny temat odzysku energii mechanicznej traconej podczas hamowania pojazdu z naczepą. Omówiono budowę naczep do przewozu żywych zwierząt oraz problemy z tym związane. Przedstawiono obecne rozwiązanie natleniania naczepy z żywym inwentarzem. Przeliczono moc traconą podczas hamowania pojazdu z naczepą. Omówiono założenia teoretyczne, zasadę działania i rozwiązania konstrukcyjne układów odzysku energii podczas hamowania. Zaproponowano akumulację energii w formie sprężonego powietrza.

1. WSTĘP

Transport drogowy należy do największych, najbardziej powszechnych i w niektórych okolicznościach do najtańszych metod przemieszczania ładunków. Transportuje się wszystko: od elementów stalowych po żywność, chemię, paliwa, kończąc na żywych zwierzętach. W artykule Autorzy podjęli się zadania związanego z konstrukcją naczepy do transportu żywego drobiu: kury, kaczki, indyki i gęsi, w której będą zastosowane rozwiązania pozwalające zapewnić bezpieczny ich przewóz: rozmieszczenie zwierząt, tłoczenie dodatkowego powietrza, obniżenie temperatury. Drugim ważnym kryterium podczas konstruowania będzie odzysk energii traconej podczas hamowania i wykorzystanie jej do celów zabezpieczenia transportu żywych zwierząt. Zastosowane rozwiązania pozwalają oszczędzać energię i przyczyniają się do oszczędności paliwa.

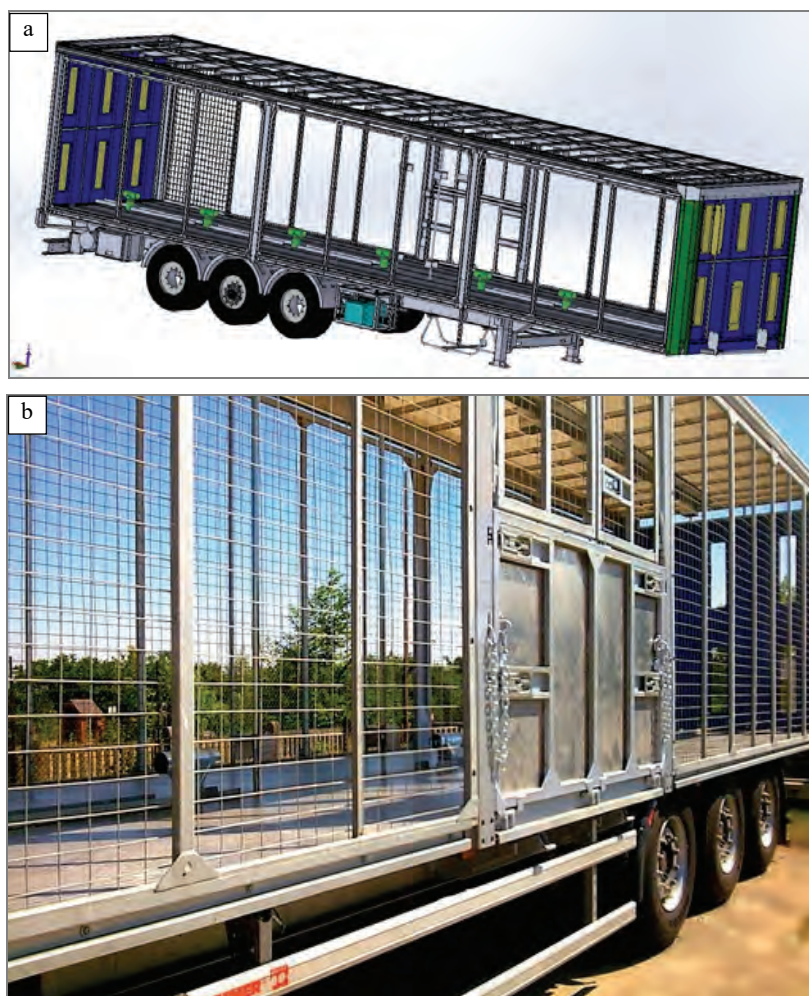
2. KONSTRUKCJA NACZEPY DO PRZEWOZU DROBIU

Do przewozu drobiu stosuje się naczepy wyposażone jedynie w klatki, w których drób jest stłoczony co ogranicza swobodę jego ruchu ale zwiększa możliwość prze-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Koło Naukowe Skrzyneczka, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

wożenia jego większej ilości. Klatki mogą stanowić zabudowę naczepy lub być do niej wkładane. Zagęszczenie drobiu w klatkach przyczynia się do wzrostu temperatury wewnątrz naczepy, a odchody zawierające amoniak mają wpływ na zmniejszenie ilości tlenu. Dlatego problemem tego sposobu transportowania drobiu była duża utrata ładunku żywego z powodu niedotlenienia zwierząt. W porze letniej wynosi nawet 30%, generując olbrzymie straty dla przedsiębiorców drobiarskich.

Biorąc pod uwagę powyższe kryteria zdecydowano wyposażyć naczepy w układ z dodatkową wentylacją. W pierwszym układzie wentylacji powietrze będzie dostarczane odpowiednimi kanałami do wnętrza naczepy w wyniku ruchu powietrza jaki powstaje podczas jazdy. Drugi układ wentylacji będzie składał się wentylatora zainstalowanego pod podłogą.



Rys. 1. Naczepa do przewozu drobiu: a – rysunek 3D naczepy, b – widok naczepy po zespawaniu

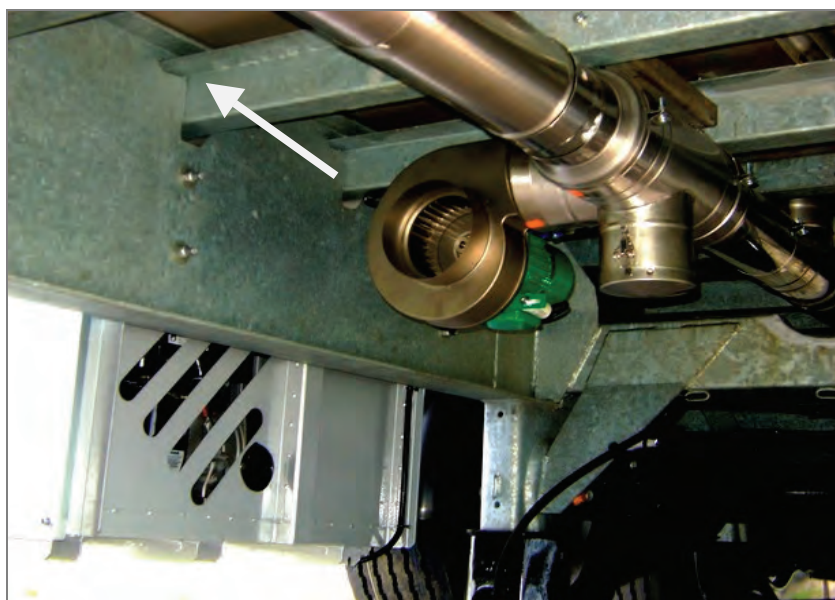
Na rysunku 1 przedstawiono naczepę do przewozu drobiu. Rysunek 1a przedstawia złożenie naczepy, a rys. 1b – widok po procesie spawania.

Ze względu na amoniak podłoga wykonana jest ze stali nierdzewnej, a konstrukcja nośna ze stali „Domex” co pozwoliło obniżyć masę naczepy o 25%. Naczepę wyposażono w opony firmy Dunlop o zmniejszonym współczynniku tarcia oraz zwiększonym okresem trwałości na eksploatację.

Na naczepę nałożono plandekę pozwalającą na dodatkowy dopływ powietrza do wnętrza.

Na rysunku 2 przedstawiono fotografię wentylatora promieniowego o wydajności 860 m³/h napędzanego prądem przemiennym 230 V o mocy 0.180 kW wykonanego z materiałów kwasoodpornych. Dla wielkości naczepy 3 × 3 × 14 m = 130 m³ co pozwala wymienić powietrze wewnątrz niej aż sześć razy w ciągu godziny. Układ dodatkowej wentylacji składa się z układu rurociągu z 6 dyszami o średnicy 120 mm rozmieszczonego wzdłuż naczepy wraz z dyszami nawiewowymi umieszczonymi w podłodze i wyczystkami pod podłogą. Zastosowanie wyczystek wynika z potrzeby usuwania odchodów zwierzęcych (wysokie stężenie azotu).

Cała instalacja rurociągu wykonana jest ze stali kwasoodpornej.



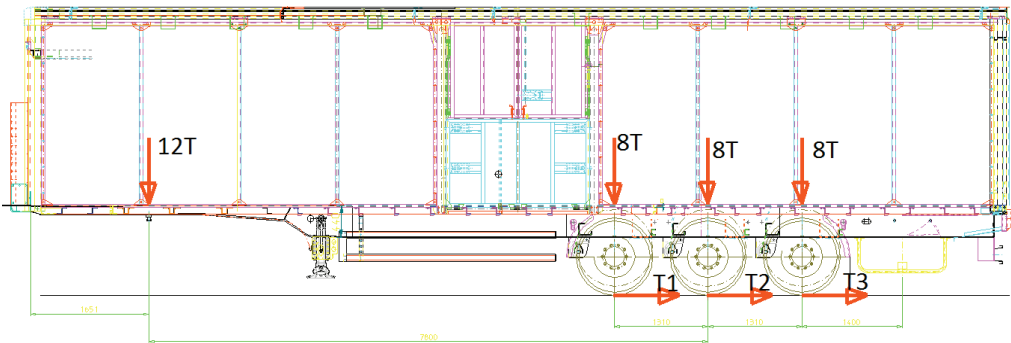
Rys. 2. Widok wentylatora promieniowego do zasilania wnętrza naczepy.
Strzałką wskazano wyczystki

Zastosowane rozwiązanie wymaga zastosowania dodatkowego zasilania w formie agregatu prądotwórczego bądź układu baterii z przetwornicami, na którego umiejscowienie przeznaczono skrzynię (widoczną po lewej stronie wentylatora). Dodatkowe zasilanie generuje dodatkowe koszty, które podczas transportu drobiu należy ponieść.

3. KONSTRUKCJA NACZEPY Z UKŁADEM ODZYSKU ENERGII TRACONEJ PODCZAS HAMOWANIA

3.1. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

Hamowanie naczepy z żywym drobiem powinno odbywać się w sposób łagodny. Zestaw naczepa z drobiem plus ciągnik tworzą czterdziestotonowy pojazd dysponujący siłą bezwładności 372 kN oraz energią kinetyczną równą 12500 kJ uzyskaną przy prędkości 90km/h. Dane te pozwalają zaproponować rozwiązanie z wykorzystaniem energii odzyskanej podczas hamowania, gdyż inaczej będzie zamieniana w ciepło powodując ścieranie okładzin ciernych i tarcz.



Rys. 3. Schemat dla obliczenia energii hamowania

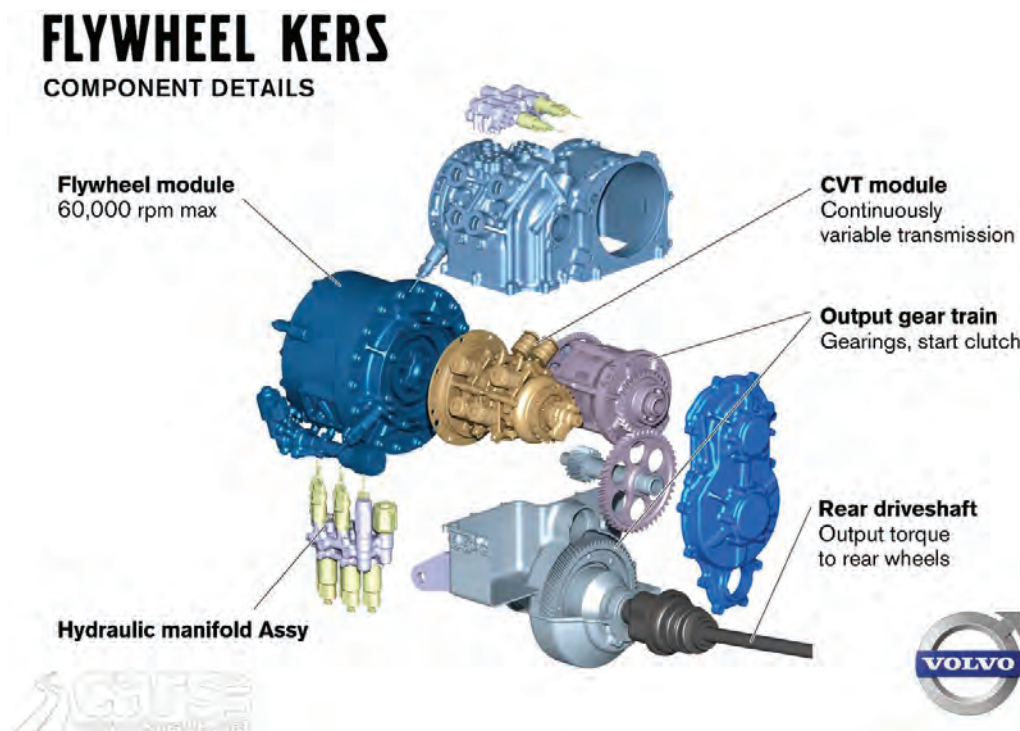
Na rysunku 3 przedstawiono schemat naczepy wykorzystany do obliczeń: na każdą oś naczepy działa siła 80 kN a na oś ciągnika 120 kN. Przy założeniu współczynnika tarcia równego 0,5 siła tarcia na jednej osi wynosi 20 kN.

3.2. SPOSOBY ODZYSKU ENERGII HAMOWANIA

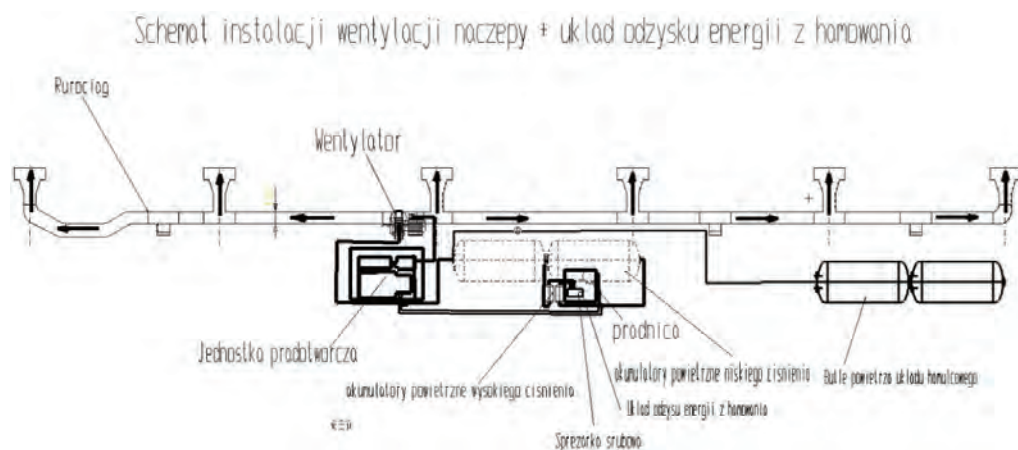
Jednym z możliwych rozwiązań odzysku energii jest zastosowanie instalacja Systemy Typu „KERS” (*Kinetic Energy Recovery System*) do odzyskiwania energii podczas hamowania zamieniając ją na prąd elektryczny, którą przedstawia rys. 4 [1, 2]. Układ ten można zaadoptować do ładowania akumulatorów podłączonych do silnika wentylatora i akumulatora ciągnika.

Inne rozwiązanie odzysku przedstawiono schematycznie na rys. 5. Energię odzyskaną podczas hamowania zamienia się na energię sprężonego powietrza, które gromadzi się w zbiornikach wysokiego ciśnienia – 300 bar (rys. 6). Ze zbiorników powietrze jest rozprężane do zbiorników niskiego ciśnienia i poprzez dyfuzory doprowadzone do układu wentylacji wnętrza naczepy. Poprzez wykorzystanie procesu rozprężania uzyskuje się niższą temperaturę powietrza co pozwala klimatyzować wnętrze naczepy

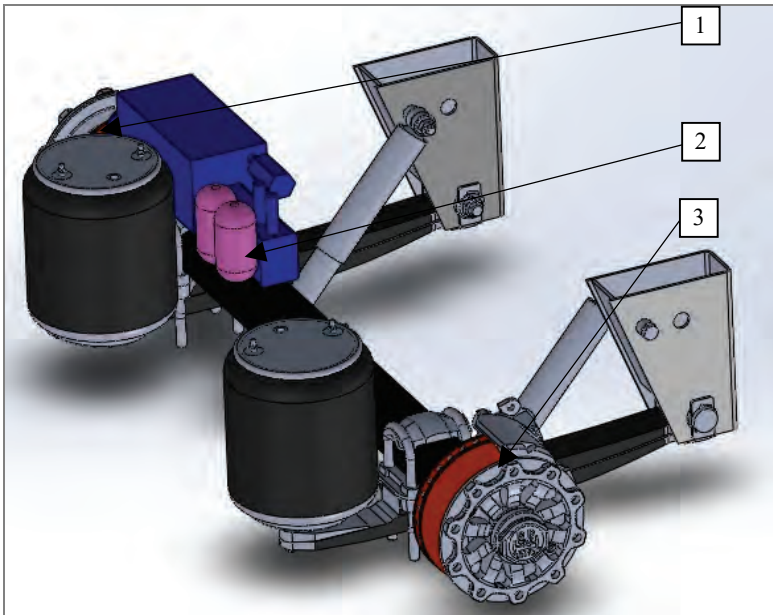
w sezonie letnim. Nadmiar sprężonego powietrza posłuży do napędu generatora prądowego.



Rys. 4. Schemat odzysku energii stosowany przez firmę VOLVO [1]



Rys. 5. Schemat odzysku energii hamowania naczepy w formie sprężonego powietrza – rozwiązanie własne



Rys. 6. Oś naczepy z układem odzysku energii hamowania w formie sprężonego powietrza:
1 – kompresor, 2 – butle 300 bar, 3 – generator elektryczny napędzany sprężonym powietrzem

4. WNIOSKI

Niniejszą pracę można zakończyć następującymi wnioskami i uwagami:

1. Z analizy literatury oraz wstępnych obliczeń wynika że sprawność układu odzysku energii podczas hamowania wynosi niewiele ponad 50%, natomiast energia w sprężonym powietrzu jaką można odzyskać przy całkowicie obciążonym zestawie (ciągnik z naczepą) to 35% energii kinetycznej wynikając z bilansu (p. 3.1);
2. układ wentylacji zasilany „energją z hamowania” to układ ekologiczny, pozwalający na duże oszczędności energii. Wadą są wysokie koszty związane z budową instalacji;
3. Schłodzenie powietrza podczas rozprężania pozwoli na obniżenie temperatury wewnątrz naczepy zwiększając komfort przewozu drobiu w okresie letnim;
4. Zastosowanie bezawaryjnego układu odzysku energii podczas hamowania pozwala wydłużyć okres działania klocków i tarcz hamulcowych klasycznego układu hamowania.

LITERATURA

- [1] CIBULKA J., *Kinetic energy recovery system by means of flywheel energy storage*, *Advanced Engineering*, 1998, Vol. 3, No. 1, pp. 27–38.
- [2] SIDDHARTH K. PATIL., *Regenerative Braking System in Automobiles*, *International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, 2012, Vol. 2, pp.45–46.

*motoryzacja, BMW E36, pojazd elektryczny,
drift, motorsport, klatka bezpieczeństwa,
konwersja pojazdu, modyfikacje zawieszenia*

Patrick RUTKOWSKI*
Zbigniew ŻELAZNY*

KONWERSJA BMW E36 NA POJAZD O NAPĘDZIE ELEKTRYCZNYM PRZYSTOSOWANY DO JAZDY W KONTROLOWANYM POŚLIZGU

W artykule znajdują się opisy modyfikacji, które są konieczne do przebudowania seryjnego BMW w zasilany elektrycznie pojazd zdolny do konkutowania w zawodach driftowych z samochodami o napędzie konwencjonalnym. Obejmują one: sportowe zawieszenie, montaż oraz chłodzenie trójfazowego silnika prądu zmiennego i klatkę bezpieczeństwa. Pojazd ten ma służyć zmianie wizerunku aut elektrycznych w oczach fanów samochodowych sportów wyczynowych.

1. POMYSŁ ORAZ ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Od 2013 roku studenci zrzeszeni w Kole Naukowym Pojazdów i Robotów Mobilnych myśleli o projekcie stworzenia pokazowego samochodu elektrycznego. Podczas burzy mózgów zdecydowali jednak, aby pójść o krok dalej – zbudować pierwszy w Polsce elektryczny pojazd do driftu.

Drift – sztuka kontrolowania poślizgu auta i pokonywania zakrętów w płynnych ruchach podczas utraty trąkcyj tylnej osi i maksymalnych wychyleniach kół przednich. Jest jednym z najbardziej wymagających sportów samochodowych pod względem konstrukcyjnym i wydajnościowym.

Koło Naukowe posiadało już świetną bazę pod tego typu projekt: BMW E36 318i z 1994 roku w wersji sedan. Ten model BMW widoczny na rys. 1 jest konstrukcją bardzo często przerabianą pod kątem zawodów z uwagi na spójność nadwozia, dużą dostępność części oraz idealną do nauki, nieskomplikowaną konstrukcję zawieszenia.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.



Rys. 1. BMW E36

Główne cele i założenia projektu to:

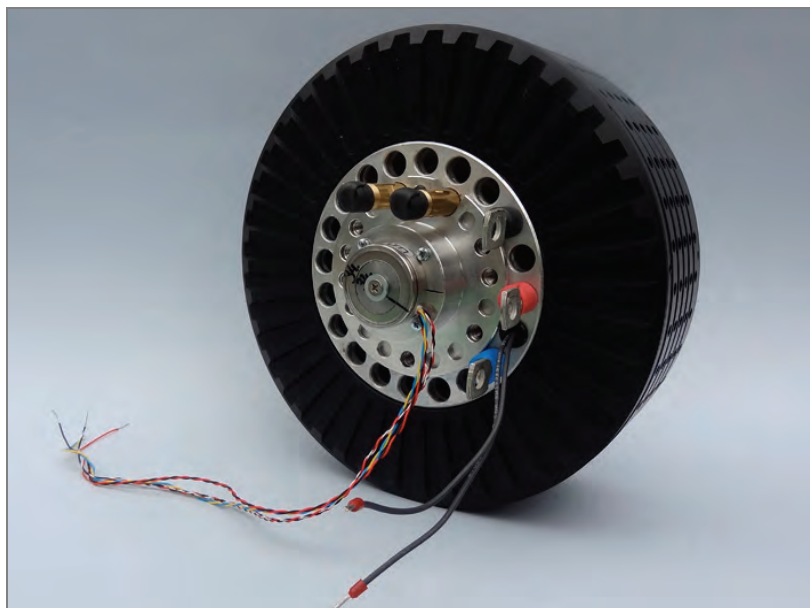
- modyfikacja oryginalnego przeniesienia napędu do współpracy z silnikiem elektrycznym o dużym momencie obrotowym,
- opracowanie wydajnego chłodzenia silnika,
- modyfikacja zawieszenia pod kątem driftu, zawierająca wykonanie własnych wahaczy, camberplates oraz zastosowanie gwintowanych kolumn,
- wzmocnienie konstrukcji przez montaż profesjonalnej klatki bezpieczeństwa,
- zaprojektowanie i wykonanie pedalboxa,
- optymalne rozłożenie masy w pojeździe,
- połączenie wszystkich czujników oraz kontrola silnika przez spójny system oparty na magistrali CAN,
- zaprogramowanie systemu wspomagania i kontroli poślizgu,
- przygotowanie systemów bezpieczeństwa do norm obowiązujących na zawodach,
- redukcja wagi pojazdu poprzez wykonanie maski, nadkoli, kłapy bagażnika oraz przednich drzwi z laminatu; usunięcie szyberdachu, bitumicznych mat wyciszających, tylnych drzwi.

2. MODYFIKACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO

W pierwszej, testowej fazie projektu użyty zostanie bezszczotkowy, chłodzony powietrzem trójfazowy silnik elektryczny EMRAX 228 (rys. 2) słoweńskiej firmy ENSTROJ, silnik o „najwyższym na świecie współczynniku mocy do wagi” [3].

Wykres mocy oraz momentu silnika w zależności od obrotów znajduje się w tabeli 1 na końcu artykułu.

Przy wadze zaledwie 12 kg generuje on maksymalną moc 100 kW oraz do 60 kW mocy ciągłej. Z naszego punktu widzenia jego najważniejszym parametrem jest wysoki moment obrotowy wynoszący aż 250 Nm od 0 obr/min, co znacząco zwiększa jego użyteczność do jazdy w drifcie.



Rys. 2. Silnik EMRAX 228

2.1. SKRZYŃNIA BIEGÓW

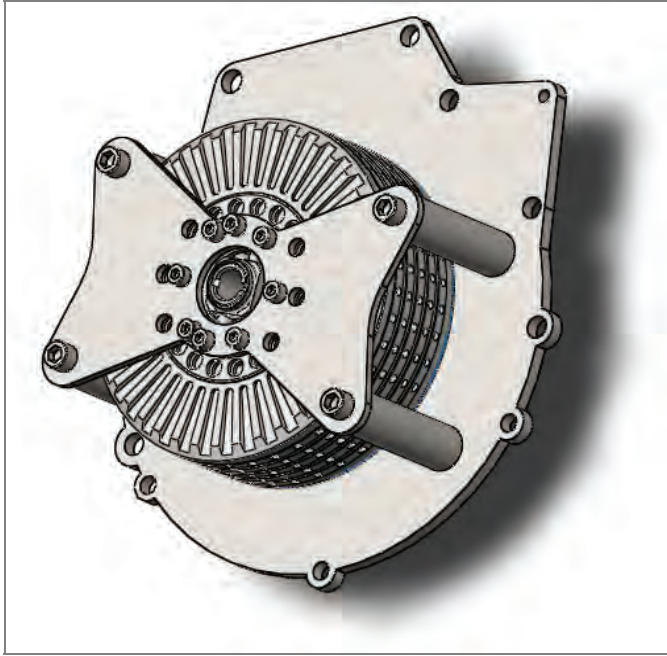
BMW, które konwertujemy to model 318i w oryginale dysponujący silnikiem 1.8 l o mocy 75 kW, momentem 150 Nm przy 3900 rpm oraz 5-biegową skrzynią GETRAG. W naszym układzie napędowym wykorzystamy skrzynię biegów BMW, jednak znacznie wyższy moment obrotowy wymusza zastosowanie skrzyni od modelu M51 o współgrających parametrach [4]

2.2. DYFERENCJAŁ

Kolejnym ważnym elementem przeniesienia napędu jest dyferencjał. Decydującym parametrem jest tutaj możliwie największe przełożenie tylnego mostu. Ze wszystkich mostów BMW e36 zdecydowaliśmy się na model z 316iA o stosunku zębów 4.44:1 – „najkrótszy” z możliwych [4]. Wybrany dyferencjał, aby nadawał się do driftu, należy uprzednio unieruchomić, poprzez spawanie metalowego elementu pomiędzy satelitarne koła zębate.

2.3. MOCOWANIE SILNIKA

Po rozpatrzeniu wielu opcji mocowania silnika zdecydowaliśmy się na model widoczny na rys. 3.



Rys. 3. Mocowanie silnika do skrzyni biegów

Jego zalety to:

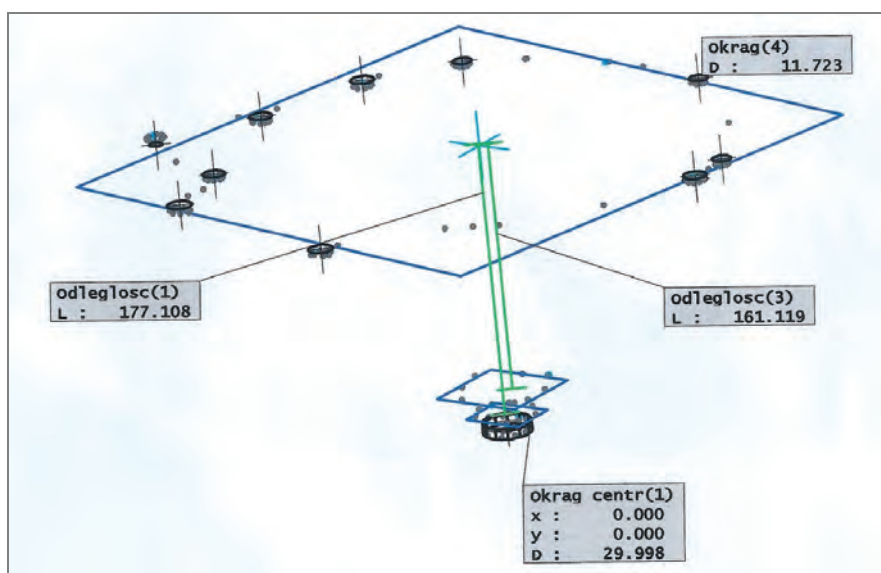
- wykonanie nie wymaga spawania,
- możliwe jest wykorzystanie lepszej gatunkowo stali,
- wycinanie blach za pomocą sterowanego numerycznie cięcia laserem jest szybkie i mało kosztowne,
- zastosowanie tulei w konstrukcji podtrzymującej silnik nie zakłóca swobodnego oddawania gorącego powietrza z silnika,
- silnik znajduje się w łatwo dostępnym miejscu, a do jego zdjęcia wystarczy odkręcić cztery śruby mocujące.

2.4. PROCES PROJEKTOWANIA MOCOWANIA, OPIS POMIARÓW

Do zaprojektowania płyty mocującej konieczne było wykonanie pomiarów kołnicza skrzyni biegów. W tym celu rozmontowana została oryginalna skrzynia biorąc pod uwagę, że mocowanie naszej docelowej jednostki ma identyczne wymiary, co umożliwiło nieingerowanie w integralność wybranej przez nas części. Wymiarowanie wy-

konane zostało w Pracowni Metrologii i Badań Jakości Politechniki Wrocławskiej dzięki uprzejmości dr. inż. Jacka Ziemby. Użyte zostało ramię współrzędnościowe marki Mitutoyo, dzięki któremu uzyskaliśmy dokładność rozstawu otworów rzędu mikrona. Jako środek układu przyjęliśmy centralne łożysko wałka skrzyni z offsetem do płaszczyzny otworów mocujących, a oś y dobraliśmy tak, by przebiegała ona przez środek otworu oznaczonego jako kierunkowy.

Świadcstwo badań uzyskaliśmy w formie listy współrzędnych punktów oraz ich reprezentacji graficznej. Wynik badań jest dla zainteresowanych dostępny do wglądu [5]. Reprezentacja graficzna widoczna jest na rys. 4.



Rys. 4. Płyta mocująca-pomiar geometrii

Drugim krokiem koniecznym do zakończenia etapu projektowania będzie wykonanie modelu 3D samego kołnierza. O pomoc w tej kwestii zwróciliśmy się do Centrum Zaawansowanych Technik Produkcyjnych CAMT na Politechnice Wrocławskiej, gdzie dzięki uprzejmości dr. inż. Tomasza Będzy i jego wiedzy w zakresie inżynierii odwrotnej, posiadana przez nas część zostanie zeskanowana do modelu 3D CAD w celu policzenia naprężeń Metodą Elementów Skończonych (FEM).

2.5. OBLICZENIA ZWIĄZANE Z PRZENIESIENIEM NAPĘDU

Do obliczeń posłużyły wartości przełożeń skrzyń BMW E36 [4] oraz ogólne wzory z Podstaw Konstrukcji Maszyn [6].

Zastosowanie pojazdu do jazdy w drifcie wymaga od napędu przede wszystkim dwóch ważnych parametrów:

- wysokiego momentu obrotowego na pierwszym biegu do szybkich przyspieszeń oraz efektywnego zrywania przyczepności,
 - wysokiej prędkości obrotowej na ostatnim przełożeniu do utrzymania braku przyczepności przy dużych prędkościach,
- dlatego też przy obliczeniach interesują nas głównie biegi I i V.

2.5.1. DANE

$u_I = 4,23$ – przełożenie I biegu,
 $u_V = 1,00$ – przełożenie V biegu,
 $u_{diff} = 4,44$ – przełożenie dyferencjału,
 $T_{max}^{in} = 250$ Nm – max moment silnika,
 $n_{max}^{in} = 5500$ rpm – max obroty silnika,
 $d_W = 635$ mm – średnica koła [7].

2.5.2. OBLICZENIE MAKSYMALNEGO MOMENTU NA KOŁACH NA I PRZEŁOŻENIU

I EMBED Equation. 3 III

2.5.3. OBLICZENIE MAKSYMALNEJ TEORETYCZNEJ PRĘDKOŚCI POJAZDU

$O_W = 3,142 * d_W = 1995$ mm,
 $n_{max}^{out} = n_{max} \div (u_V * u_{diff}) = 1238,74$ rpm,
 $v_{max} = n_{max}^{out} * O_W = 2\ 471\ 286$ mm/min,
 $v_{max} = 148,28$ km/h.

Dane te nie uwzględniają strat energii nieodłącznie związanych z przeniesieniem napędu, którego sprawność η mieści się w przedziale 90–95%. Dokładne informacje zebrane zostaną dopiero po złożeniu zespołu napędowego, jednak na etapie projektowym, dzięki porównaniu z innymi pojazdami tego typu pozwalają nam one stwierdzić, że są wystarczające do prowadzenia testów oraz wprowadzenia pojazdu w kontrolowany poślizg. Pomocne będą również na poziomie obliczania naprężeń i sił działających na pojazd podczas analizy Metodą Elementów Skończonych.

3. CHŁODZENIE SILNIKA

O wydajności oraz żywotności każdej jednostki napędowej w dużym stopniu decyduje jej chłodzenie. Szczególnie ma to znaczenie przy stosowanym przez nas napędzie elektrycznym. Silnik EMRAX posiada dużą sprawność, którą można odczytać z tabeli 2. Jak łatwo zauważyć w krytycznych momentach może ona jednak spaść do ok. 93%, co oznacza, że silnik przy maksymalnym momencie i maksymalnych obrotach może generować do 6kW strat, które to niemal w 98% będą przekładały się na energię cieplną.

Nasza wersja silnika została wyposażona w chłodzenie powietrzem. Wloty zlokalizowane są koncentrycznie wokół mocowania, a wylot stanowią otwory na zewnętrznej części obracającej się obudowy. Problem techniczny polega na dostarczeniu powietrza w sposób wystarczająco efektywny, by odprowadzić całe ciepło na zewnątrz w celu utrzymania temperatury magnesów i cewek silnika na poziomie ok. 60° C, co według konstruktora pozwoli na nawet kilkukrotne wydłużenie czasu działania na maksymalnej mocy.

Rozwiązanie problemu studenci znaleźli pod maską turbodoładowanego silnika spalinowego.

Do chłodzenia użyjemy zimnej części turbiny samochodowej Garrett napędzanej silnikiem elektrycznym. Będzie to turbina osadzona na ceramicznych łożyskach kulowych ze względu na brak konieczności dodatkowego smarowania olejem silnikowym. Jako napęd dla sprężarki idealnym rozwiązaniem jest przystosowanie silnika oraz przełożenia ze szlifierki kątovej. Zapewni to wysoką moc oraz przede wszystkim wysokie obroty (do 15000 rpm) łopat sprężających.



Rys. 5. Podobne rozwiązanie stosowane przy doładowaniu silnika spalinowego [8]

Zalety takiego rozwiązania:

- do chłodzenia użyta zostanie właściwość gazu do pobierania energii przy rozprężaniu,

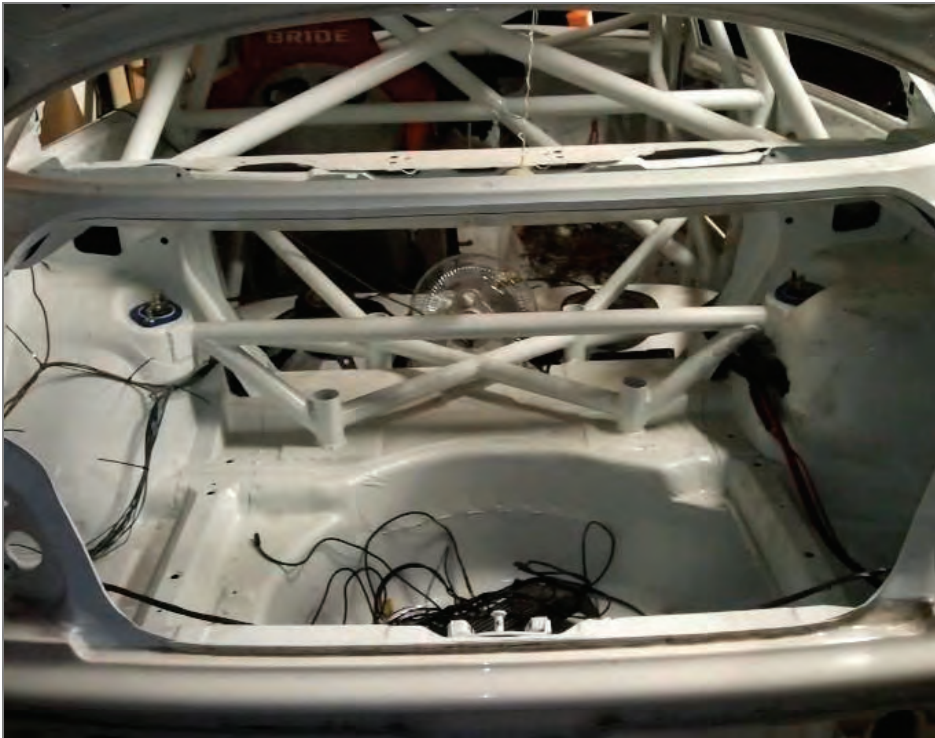
- sprężarka ma dosyć energii by do układu włączyć również samochodowy inter-cooler, dodatkowo chłodzący oraz pozwalający na lepszą kompresję gazu,
- dostępność części,
- łatwa modyfikacja,
- wydajność,
- geometria łopat wirnika będzie stale wymuszała przepływ powietrza, co jest dużym atutem względem zastosowania zwykłego wentylatora.

4. POZOSTAŁE PRACE ZWIĄZANE Z PRZEBUDOWĄ

Przystosowanie samochodu do driftu obejmuje również szereg innych prac związanych ze wzmocnieniem konstrukcji oraz modyfikacją zawieszenia.

4.1. KLATKA BEZPIECZEŃSTWA – POPRAWA SZTYWNOŚCI

Dla zwiększenia sztywności zawieszenia koniecznością jest wzmocnienie nadwozia konstrukcją rurową zwaną potocznie klatką bezpieczeństwa. W BMW E36, minimum



Rys. 6. Widoczne jest wzmocnienie mocowania tylnego wózka oraz belka łącząca kielichy i poprawiająca sztywność tylnej osi [11]

opisane załącznikiem J MKS FIA Polskiego Związku Motorowego [9] musi zostać rozbudowane o dodatkowe zastrzały do przednich i tylnych kielichów zawieszenia oraz uwzględnić specjalne wzmocnienie mocowania dyferencjału z uwagi na częste uszkodzenia tego punktu. Klatka zostanie wykonana według naszego projektu przez zajmującą się profesjonalnym przygotowaniem aut do sportu firmę Forge Racing z Poznania [10].

4.2. PEŁNA KONTROLA NAD GEOMETRIĄ – MODYFIKACJA ZAWIESZENIA

Technika driftu wymusza na pojeździe ekstremalne kąty skrętu przedniej osi oraz duże przechylenia nadwozia. Zawieszenie stosowane seryjnie nie jest przystosowane do takich pozycji, i zostawienie go skutkowałoby małą powierzchnią kontaktu przednich opon z nawierzchnią, co bezpośrednio wpływałoby na nadmierne zużycie opon oraz kiepską przyczepność. Temat regulacji zawieszenia został bardzo dokładnie i przystępnie omówiony w artykule portalu race4fun.pl [12], dlatego zainteresowanych tematem odsyłam do tej publikacji.

Bazując na informacjach z ww. artykułu zdecydowaliśmy się wykonać własne wahacze oraz camberplates w celach eksperymentalnych.



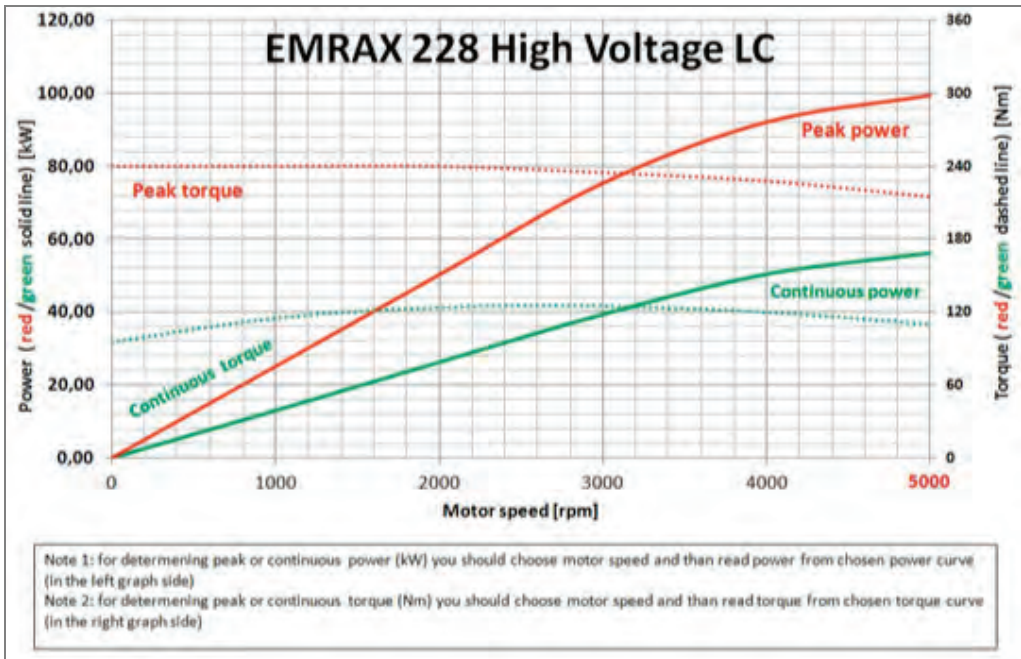
Rys. 7. Koncept designerski końcowego wyglądu ZeroEmissionCar

Ważnym dodatkiem do zawieszenia jest również wymiana fabrycznych gumowych tulei na łączeniach elementów, zaprojektowanych w celu maksymalizacji komfortu

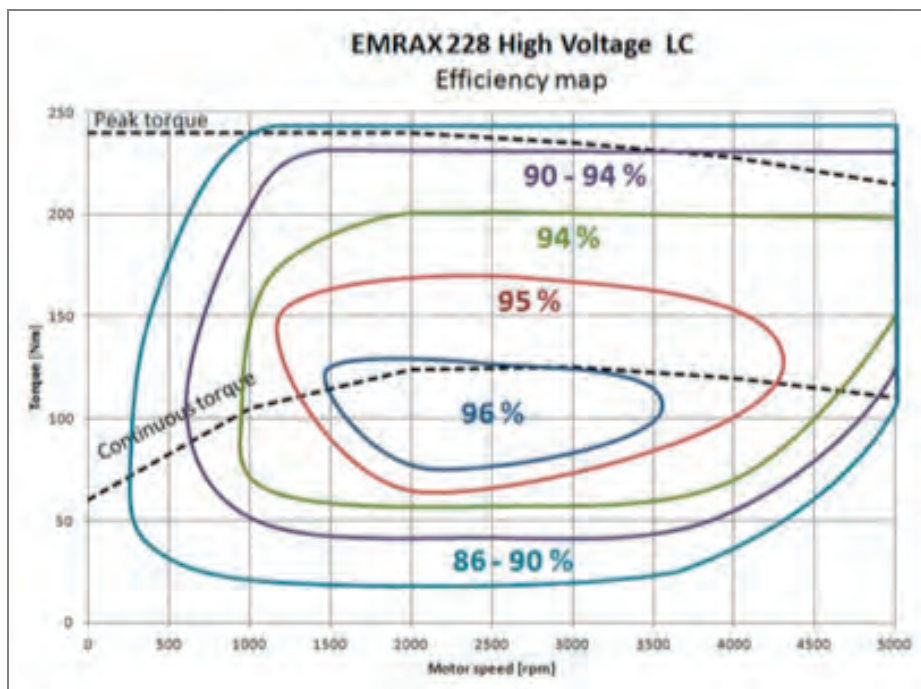
jazdy na specjalnie do tego przeznaczone tuleje poliuretanowe o dużo wyższej twardości (min 90 Sh A) i wytrzymałości na rozciąganie (do 70 MPa), co znacząco poprawia właściwości trakcyjne pojazdu. Komplet tulei do zawieszenia ZeroEmissionCar wykona nieodpłatnie na zamówienie nasz sponsor, znana z produktów wysokiej jakości firma Deuter z Olkusza [13]

5. PODSUMOWANIE

Projekt ZeroEmissionCar to duża szansa dla przyszłych inżynierów. Udział w nim daje studentom prawdziwą, podpartą doświadczeniem wiedzę z zakresu mechaniki samochodowej, projektowania, analiz wytrzymałościowych, analiz przepływu, elektryki, elektroniki, programowania oraz otwiera dostęp do poznawania zaawansowanych technologii dostępnych na Politechnice Wrocławskiej. Niniejszy artykuł stanowi podsumowanie zakończonej fazy koncepcyjnej projektu. Prace związane z budową pojazdu rozpoczną się w czasie letniej przerwy międzysemestralnej, a zakończenie oraz prezentacja planowana jest na koniec roku kalendarzowego 2015.



Rys. 8. Wykres momentu oraz mocy w zależności od obrotów silnika EMRAX 228



Rys. 9. Wykres sprawności silnika EMRAX 228

LITERATURA

- [1] http://www.motortrend.com/roadtests/alternative/1411_2015_tesla_model_s_p85d_first_test/#ixzz3aub0dANr
- [2] Oficjalne dane na temat Model S <http://www.teslamotors.com>
- [3] Oficjalne dane na temat silnika EMRAX 228 <http://www.enstroj.si>
- [4] Stopnie przełożeń skrzyni biegów wszystkich modeli BMW E36 <http://www.bokchoys.com/differential/GearRatios.htm>
- [5] Na życzenie pod adresem zeroemissioncar.pwr@gmail.com
- [6] Obliczenia zostały wykonane w oparciu o wzory dostępne w publikacji dr. A. Golenko: „Fundamentals of Machine Design A coursesbook for Polish and Foreign Students”.
- [7] Rozmiary felg E36 <http://www.rozmiaryfelg.pl/bmw.htm>,
kalkulator średnicy koła: <http://www.opony.com.pl/narzedzia/zamienniki-opon/225/45r17/>
- [8] <http://www.phantomsuperchargers.com/>
- [9] http://pzm.pl/pliki/zg/samochody/regulaminy/FIA/FIA_J/art253_2012.pdf
- [10] <http://www.rallyandracing.pl>
- [11] http://www.bimmerforums.com/forum/showthread.php?914953-*Official*-E36-Roll-Cage-Photo-Thread/page2
- [12] <http://race4fun.pl/e36-przygotowanie-do-sportu-zawieszenie-cz-2-3/>
- [13] <http://www.poliuretan.olkusz.pl>
- [14] Postępy projektu można śledzić na www.facebook.com/ZeroEmissionCar

Daniel SŁOMIŃSKI*
Andrzej BORAWSKI*

PROJEKT WTRYSKIWACZA BENZYNOWEGO DO BOLIDU FSAE

Zawody Formuła Student są najbardziej prestiżowymi zawodami motoryzacyjnymi organizowanymi dla studentów. Budowane pojazdy wykazywać się muszą zaawansowaną konstrukcją, małą masą oraz dobrymi osiągami. Ocenie poddawana jest m.in. innowacyjność zastosowanych rozwiązań, dlatego też podjęto próbę zaprojektowania i zbudowania wtryskiwacza paliwa odpowiedniego do zastosowanego silnika. Pomysł ten powstał z powodu konieczności zastosowania zwężki w układzie dolotowym, oryginalny wtryskiwacz jest więc zbyt duży. Na potrzebę projektu wykonano model matematyczny oraz symulację komputerową przepływu paliwa.

1. WSTĘP

Formuła Student jest ogólnoswiatowym cyklem zawodów dla studentów uczelni technicznych, w którym głównym celem jest zbudowanie sportowego auta typu Open Wheel (rysunek 1). Zespoły konkurują ze sobą w szeregu konkurencji, które podzielić można na konkurencje statyczne: Design, Cost Report, Business Plan, oraz dynamiczne: Acceleration, Skid Pad, Autocross, Endurance. Szczegółowy regulamin opisujący każdy aspekt konstrukcyjny auta wyznacza wszystkim zespołom sztywne zasady jakie ma spełniać auto klasy FSAE.

Główną tematyką prac autorów w projekcie jest silnik oraz zespół układów z nim współpracujących. Regulamin Formuły Student określa maksymalną pojemność skokową silników aut, która wynosi 610 cm^3 , oraz nakazuje zwężkę w układzie dolotowym o średnicy 20 mm. Są to główne wyznaczniki cechujące możliwości silników w tej klasie aut. Stąd najczęstszym źródłem jednostek napędowych są motocykle sportowe. Zdarzają się także konstrukcje (w mniejszej lub większej części) własne.

* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.



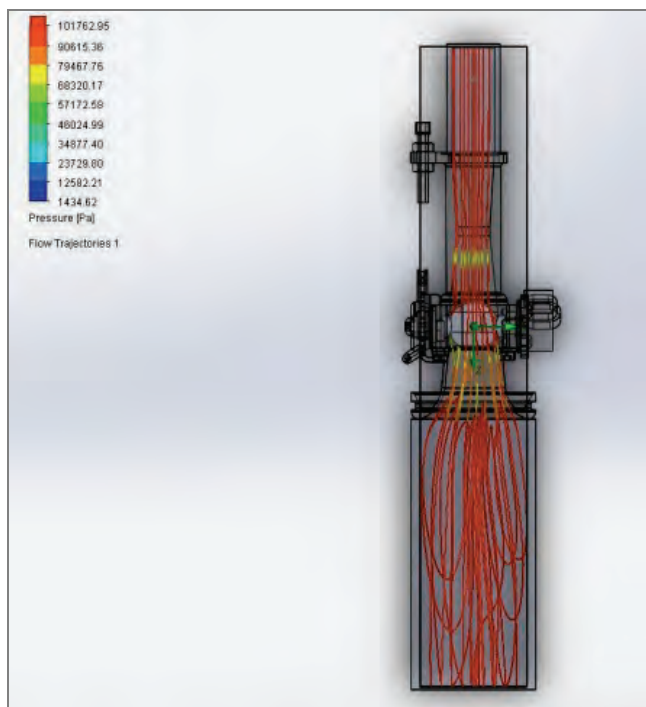
Rys. 1. Cerber Motorsport na FSC 2014



Rys. 2. Kolektor dolotowy pojazdu CMS-03

Kluczowym układem, niezbędnym do sprawnego działania silnika, przekładającym się na osiągi i zajmowane miejsca, jest układ zasilający komorę spalania w ładunek potrzebny do generowania mocy i momentu obrotowego [3, 4]. W jego skład wchodzi: kolektor dolotowy (rys. 2 przedstawia kolektor zaprojektowany do pojazdu CMS-03), przepustnica (w tym przypadku ze wspomnianą zwężką, rys. 3), regulator ciśnienia paliwa, pompa paliwa, listwa wtryskowa, zbiornik paliwa i wtryskiwacze (rys. 4).

Zadaniem wtryskiwacza jest dawkowanie paliwa dostarczanego do kolektora dolotowego w celu jego możliwie najlepszego wymieszania z powietrzem w pożądanym proporcjach. Najważniejszymi składowymi elementami wtryskiwacza są: cewka, iglica, sprężyna zamykająca i cylinder (rys. 5). Ilość dawki paliwa, która jest wtryskiwana, dobierana jest na podstawie ilości zasysanego powietrza, mierzonego poprzez różnicę ciśnień, lub pomiar masy i kąta uchylenia przepustnicy [2].



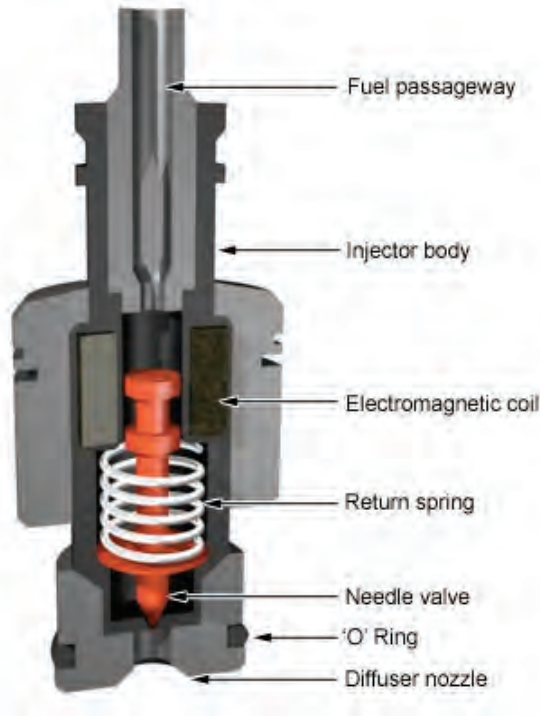
Rys. 3. Dławiony przepływ powietrza przez regulaminową zwężkę



Rys. 4. Wtryskiwacz benzynowy pojazdu CMS-03

Układ paliwowy kontrolowany jest przez zewnętrzny komputer, do którego podłączone są m.in.: czujnik ciśnienia w kolektorze dolotowym, czujnik położenia przepustnicy, czujnik temperatury zasysanego powietrza, szerokopasmowa sonda lambda, czujnik temperatury gazów wydechowych, czujnik spalania stukowego i temperatury

cieczy chłodzącej [1]. Sprawna praca wszystkich tych elementów przekłada się bezpośrednio na osiągi auta, oraz jego wskaźniki ekonomiczne, co jest oceniane po ostatniej dynamicznej próbie, którą jest Endurance. Auto w tej konkurencji musi przejechać możliwie jak najszybciej odcinek 22 km zużywając przy tym jak najmniej paliwa. Dlatego tak ważny jest układ zasilania z wtryskiwaczami na czele.



Rys. 5. Budowa wewnętrzna przykładowego wtryskiwacza benzyny [8]

2. GENEZA PODJĘCIA TEMATU

W przypadku bolidów Formuły Student wtryskiwacze, pochodzące z fabrycznych układów paliwowych, okazują się aż nadto wydajne. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest inny (w fabrycznej konstrukcji) układ sterowania silnikiem, brak zwężki ograniczającej przepływ powietrza i zupełnie inny kształt kolektora dolotowego. Fabryczne wtryskiwacze zostały zaprojektowane do działania w innych warunkach i dla innych charakterystyk pracy silnika. Wydatek oryginalnego wtryskiwacza Hondy CBR 600 RR to około 200 ml/min przy ciśnieniu 3,5 bar. Wydatek tego rzędu wystarczyłby do wygenerowania mocy około 150 KM. W przypadku bolidów FSAE osiągnane moce bardzo rzadko przekraczają 100 KM. Takie moce generowane są tylko przez silniki doładowane. Silniki wolno ssące charakteryzują się mocami maksymalnymi rzędu 75–85 KM.

Jak wspomniano, na zawodach Formula Student ocenianych jest wiele aspektów, m.in. Design. Mile widziane i korzystnie punktowane są elementy własnego projektu. Opracowywany wtryskiwacz ma się charakteryzować przede wszystkim dopasowanym do warunków zawodów wydatkiem. Zmniejszenie masy elementów ruchomych wtryskiwacza obniży jego bezwładność, co z kolei wpłynie na czas otwierania i zamykania się wtryskiwacza, czyli skróci czas wtrysku. Pozwoli także na użycie mniejszych cewek, czyli obniży się zapotrzebowanie energetyczne. Planowane jest również zwiększenie ciśnienia paliwa, co umożliwi bardziej precyzyjne niż dotychczas sterowanie procesem zasilania silnika. Badania empiryczne, których wykonanie planowane jest zaraz po zbudowaniu prototypu, zweryfikuje prawidłowość założeń. Oczekiwane jest też ograniczenie zużycia paliwa i zmniejszenie emisji toksycznych związków do atmosfery [5]. Wtryskiwacz musi także umożliwić zasilanie bioetanołem (alternatywnym paliwem dopuszczonym przez Regulamin zawodów). Nie bez znaczenia są też koszty związane z produkcją. Będą one minimalizowane, gdyż jest to jedno z kryteriów oceny na zawodach.

3. PROJEKT WTRYSKIWACZA

Projekt wtryskiwacza składa się z dwóch podstawowych części: obliczeniowej [6, 7] oraz symulacyjnej, mającej na celu zbadanie charakterystyki przepływu benzyny.

3.1. OBLICZENIA PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW

Część obliczeniową rozpoczęto od wyznaczenia wydatku wtryskiwacza. W tym celu wykorzystano zależność:

$$Q_1 = \frac{0,5 \cdot N}{0,8 \cdot n_i} \quad (1)$$

gdzie:

Q_1 – wydatek objętościowy wtryskiwacza [lbs/h],

N – moc silnika [KM],

n_i – liczba wtryskiwaczy.

Po podstawieniu wymaganych zmiennych i zmianie jednostek otrzymano:

$$Q_1 \approx 140 \text{ [ml/min]}$$

Jak wspomniano, planowane jest zwiększenie ciśnienia w układzie paliwowym. Wartość, o jaką planowana jest zmiana, to 1 bar (14 psi). Operacja taka zwiększy różnicę ciśnień między wtryskiwaczem a kolektorem dolotowym. Skutkować to będzie lepszym rozpyleniem mieszanki i krótszym czasem wtrysku, pozostawiając zapas wydatku nawet dla silnika doładowanego (co jest planowane w przyszłości). Spowoduje również wzrost wydatku, który oszacować można wg wzoru:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \cdot Q_1 \quad (2)$$

gdzie:

P_1 – planowane ciśnienie paliwa [psi],

P_2 – dotychczasowe ciśnienie paliwa [psi].

Podstawiając wartości ciśnień ($P_1 = 64$ psi, $P_2 = 50$ psi), otrzymano:

$$Q_2 = 158 \text{ [ml/min]}$$

W przekonaniu autorów, wydatek Q_2 jest w zupełności wystarczający do zasilania bolidu budowanego na zawody Formuła Student. W celu weryfikacji twierdzenia planowane jest zbudowanie prototypu i przeprowadzenie badań.

Siłę bezwładności iglicy zapisać można zależnością:

$$F_B = m_i \cdot a(t) \quad (3)$$

gdzie:

m_i – masa iglicy,

$a(t)$ – chwilowe przyśpieszenie iglicy.

Wraz z iglicą przemieszcza się część sprężyny. Zgodnie z literaturą [6] należy przyjąć, że 1/3 masy sprężyny (m_s) przemieszcza się podczas otwierania i zamykania wtryskiwacza. Uwzględniając powyższe otrzymano:

$$F_B = (m_i + 1/3m_s) \cdot a(t) \quad (3)$$

Wykorzystując prawo Faradaya [6], można wyznaczyć siłę działania cewki na iglicę:

$$F_E = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (4)$$

gdzie:

F_E – siła elektromagnetyczna pochodząca od cewki wtryskiwacza,

I – natężenie prądu płynącego w cewce,

x – przemieszczenie iglicy,

$$L = 2 \frac{W_C}{I^2} \text{ – indukccyjność cewki,} \quad (5)$$

W_C – praca wykonana przez cewkę.

Ze wzoru (4) wynika, że indukccyjność cewki zależy od położenia iglicy wewnątrz cylindra. Niewielkie przemieszczenia iglicy (około 0,1 mm) powodują, że przebieg zmiany indukccyjności, spowodowany zmianą położenia iglicy, jest zbliżony do funkcji liniowej. Istotnym natomiast jest fakt, iż indukccyjność zmienia się wraz z częstością pracy wtryskiwacza.

Indukcyjność cewki powietrznej jest trudna do wyznaczenia. Na jej wartość ma wpływ wiele czynników. Dlatego, konieczne jest jej wyznaczenie metodą doświadczalną przy wykorzystaniu mostka RLC. Niestety, na obecnym etapie prac, bez pro-

totypu, nie jest to możliwe. W projekcie dobrano więc wstępnie cewkę, która zostanie przebadana, i w razie potrzeby zastąpiona inną. Dopiero wtedy możliwe będzie opracowanie symulacji działania wtryskiwacza.

Siłę pochodzącą od ciśnienia paliwa znajdującego się wewnątrz wtryskiwacza obliczyć można z wzoru:

$$F_G = P_1 \cdot A \quad (6)$$

gdzie:

F_G – siła pochodząca od ciśnienia paliwa,

A – pole powierzchni na które oddziałuje paliwo.

Tarcie pomiędzy iglicą a korpusem będzie w rzeczywistości tarcie pomiędzy cząsteczkami płynu, czyli tarcie wiskotycznym (rys. 6). Siła tarcia wiskotycznego zależna jest od prędkości i wyraża się je zależnością [6]:

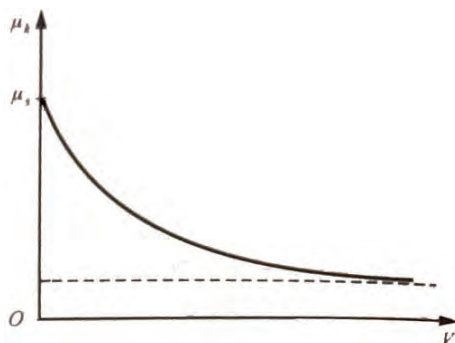
$$F'_T = \mu \frac{dx}{dt} \cdot F_N = \mu(v) \cdot F_N \quad (7)$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia,

x – przemieszczenie iglicy,

F_N – siła z jaką dociskane są powierzchnie tarcie.



Rys. 6. Zależność wartości współczynnika tarcia od szybkości przemieszczania się par tących [6]

W praktyce siła ta jest bardzo mała i waha się w granicach kilku setnych Newtona [6].

Siłę nacisku sprężyny zapisać można wzorem:

$$F_S = k \cdot x \quad (8)$$

gdzie:

F_S – siła sprężyny,

k – sztywność sprężyny.

Prawidłowo dobrana sztywność sprężyny powinna zapewniać siłę nie mniejszą niż suma siły bezwładności iglicy i siły tarcia pomiędzy iglicą a korpusem, i nie większą niż suma siły bezwładności iglicy, siły tarcia pomiędzy iglicą a korpusem, siły wynikającej z działania ciśnienia paliwa i siły generowanej przez cewkę. Warunek można zapisać:

$$F_G + F_T < F_S < F_G + F_T + F_S + F_E \quad (9)$$

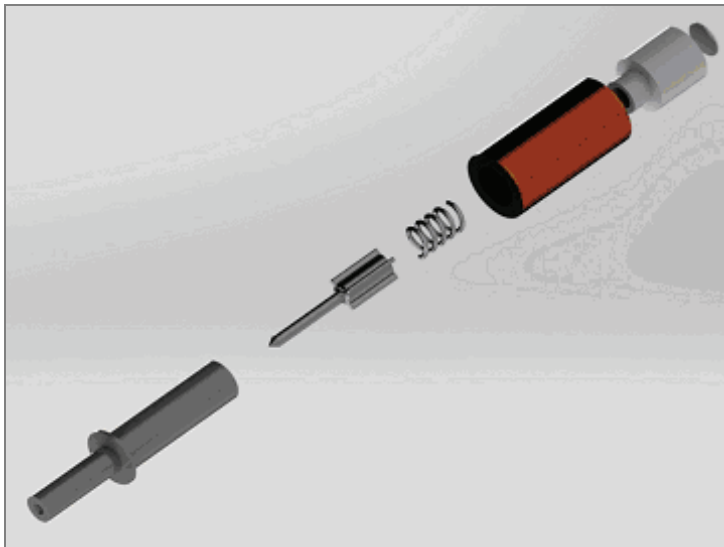
Równanie ruchu iglicy wtryskiwacza oprócz można na równaniu równowagi sił działających na nią, a mianowicie:

$$F_E = F_S + F_G + F_B + F_T + F_Z \quad (10)$$

Na podstawie równania (10) opracowana zostanie symulacja działania wtryskiwacza. Dzięki niej możliwe będzie oszacowanie czasu otwierania i zamykania.

3.2. SYMULACJA PRZEPIYWU

Jednym z najistotniejszych części wtryskiwacza jest iglica, wokół której płynie paliwo. Pozwala to na utrzymanie stałego ciśnienia wewnątrz wtryskiwacza, a dodatkowo paliwo jest ogrzewane przez cewkę (rys. 7). Skutkuje to jego lepszym odparowaniem wewnątrz kolektora dolotowego. Docelowo iglica ma być wykonana z dwóch części: dolna część z lekkiego materiału nie ferromagnetycznego (dzięki czemu zmniejszy się masa, a tym samym bezwładność iglicy), górna – z materiału ferromagnetycznego (rys. 8).

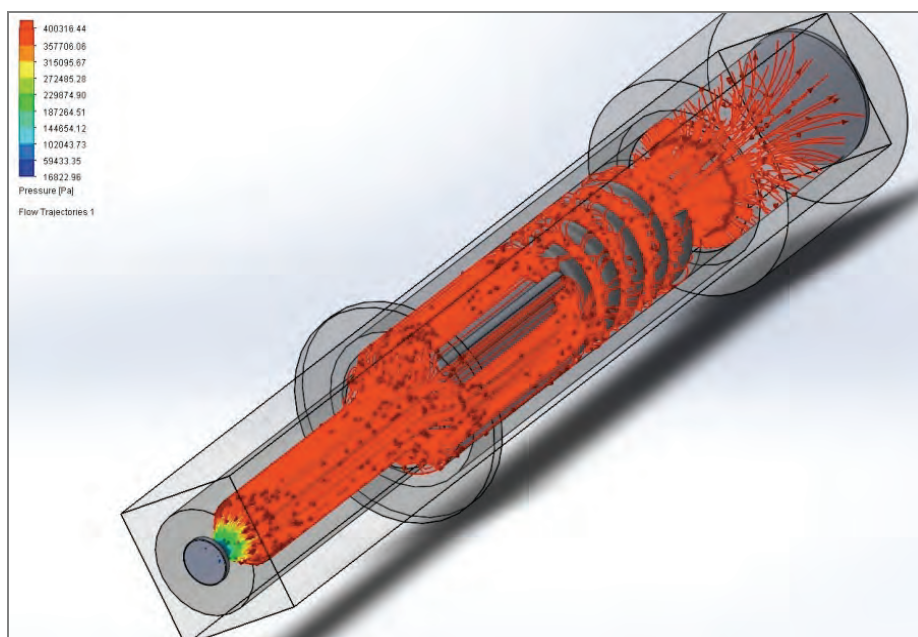


Rys. 7. Wnętrze projektowanego wtryskiwacza.
Od lewej: cylinder, iglica, sprężyna, cewka, złącze zasilające



Rys. 8. Iglica wtryskiwacza

Charakterystyka przepływu czynnika przez wtryskiwacz jest bardzo istotna. Nie mogą występować nadmierne zaburzenia przepływu, gdyż wpływają one niekorzystnie na proces wtrysku. Symulacja wykonana w środowisku Solid Works Flow Simulation (rys. 9) pokazuje, że osiągnięto pożądany efekt spadku ciśnienia na końcu iglicy. Uzyskano tym samym szybsze i lepsze odparowanie mieszanki dla zakresu otwarcia 0.1 mm.



Rys. 9. Symulacja przepływu benzyny przez wtryskiwacz dla ciśnienia w listwie wynoszącym 4,5 bar

4. WNIOSKI

Wtryskiwacz zbudowany do bolidu Formuły Student (rys. 10) będzie istotnym elementem przychylniej oceny sędziów w trakcie zawodów, gdyż jak dotąd żaden zespół nie podjął się wykonania własnego wtryskiwacza. Są to cenne punktu pod kątem konkurencji Design.



Rys. 10. Projektowany wtryskiwacz, dedykowany do bolidu FSAE

Przyjęte założenia konstrukcyjne pozwolą lepiej zrozumieć złożoną fizykę pracy układu zasilania silników spalinowych, oraz dobrać właściwą charakterystykę pracy w pożądanym warunkach, jakie stwarza inny rodzaj aut sportowych. Konfiguracja pod kątem maksymalnego wykorzystania spalanej mieszanki i poprawienie sprawności silnika pomoże w zdobywaniu wyższych ocen w rywalizacji z pozostałymi zespołami z całego świata, jak też w ocenie zużycia paliwa. Minimalne koszty wykonania są kolejną zaletą w konkurencji Business Plan. Projekt będzie rozwijany do momentu wykonania auta CMS-04, co jest planowane na rok 2017.

LITERATURA

- [1] BOSCH, *Czujniki w pojazdach samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 2002.
- [2] BOSCH, *Sterowanie silników o zapłonie iskrowym*, WKiŁ, Warszawa 2002.

- [3] KNEBA Z., MARKOWSKI S., *Zasilanie i sterowanie silników*, WKiŁ, Warszawa 2004.
- [4] KASEDORF J., *Układy wtryskowe i katalizatory*, WKiŁ, Warszawa 1996.
- [5] WENDEKER M., JAKLIŃSKI P., CZARNIGOWSKI J., *Badania strategii sterowania wtryskiem benzyny*, Silniki spalinowe, 2001, nr 3–4, 21–29.
- [6] BORAWSKI A., SIEMIENIAKO F., *Model matematyczny pracy wtryskiwacza LPG*, Pneumatyka, 2011, nr 2, 52–55.
- [7] RAHMAN M.F., CHEUNG N.C., LIM K.W., *Modeling of a Non Linear Solenoid Actuator for Operation as a Proportional Actuator*, University of New South Wales, Sydney 2008.
- [8] www.electronicinjectorservices.com.au

*pojazdy bezzalogowe, pojazd autonomiczny,
pozycjonowanie, lokalizacja, nawigacja,
sterowanie, komunikacja z otoczeniem*

Zbigniew ŻELAZNY*
Tomasz GODLEWSKI*

OBSZARY POKRYCIA SYSTEMU KOMUNIKACJI Z OTOCZENIEM W POJEŹDZIE AUTONOMICZNYM

Artykuł prezentuje obszary pokrycia systemu komunikacji z otoczeniem dla projektu Pierwszego Polskiego Pojazdu Autonomicznego, który został zrealizowany przez studentów z Koła Naukowego Pojazdów i Robotów Mobilnych działającego przy Politechnice Wrocławskiej. W pracy tej określone zostały obszary, które muszą zostać pokryte przez odpowiednie czujniki i systemy wizyjne, aby pojazd mógł w sposób bezkolizyjny realizować jazdę autonomiczną w dwóch wybranych scenariuszach: zbliżanie się do skrzyżowania, przejazd przez skrzyżowanie. W artykule zawarto propozycję algorytm decyzyjnego dla pojazdu autonomicznego pokonującego skrzyżowanie.

1. WSTĘP

System komunikacji z otoczeniem w pojeździe autonomicznym składa się z kilku podsystemów. Najogólniej ujmując ma on spełniać funkcje zmysłów kierowcy, czyli dostarczać informacji o sytuacji na drodze, jej otoczeniu, położeniu innych użytkowników ruchu oraz obiektów. Istnieje wiele sposobów na realizację tego zadania aczkolwiek wszystkie bazują na próbie naśladowania człowieka kierującego pojazdem i odbierającego bodźce zewnętrzne w postaci obrazu, oceny odległości, rozpoznaniu znaków i sygnalizacji świetlnej oraz śledzenia poruszających się obiektów. Jest to zadanie złożone i do jego realizacji wymagana jest odpowiednio duża komputerowa moc obliczeniowa. W celu oceny obszarów pokrycia systemu komunikacji z otoczeniem wymagany jest przekaz w czasie rzeczywistym danych związanych z prędkością i przyspieszeniem samego pojazdu autonomicznego oraz innych obiektów ruchomych znajdujących się w jego otoczeniu. W celu wykonania bezpiecznych manewrów należy dobrać podzespoły systemu tak, aby zapewniały prze-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

syłanie informacji z odpowiednią częstotliwością, a elementy wykonawcze w postaci urządzeń wykonawczych sterowanych przez algorytm decyzyjny powinny cechować się odpowiednio krótkim czasem reakcji. Sam czas reakcji powinien być, co najmniej równy lub mniejszy od czasu reakcji przeciętnego kierowcy. Celem tworzenia autonomicznych układów jazdy jest przyspieszenie wykrywania zagrożeń w otoczeniu pojazdu oraz minimalizacja czasu reakcji, co finalnie prowadzi do poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego.

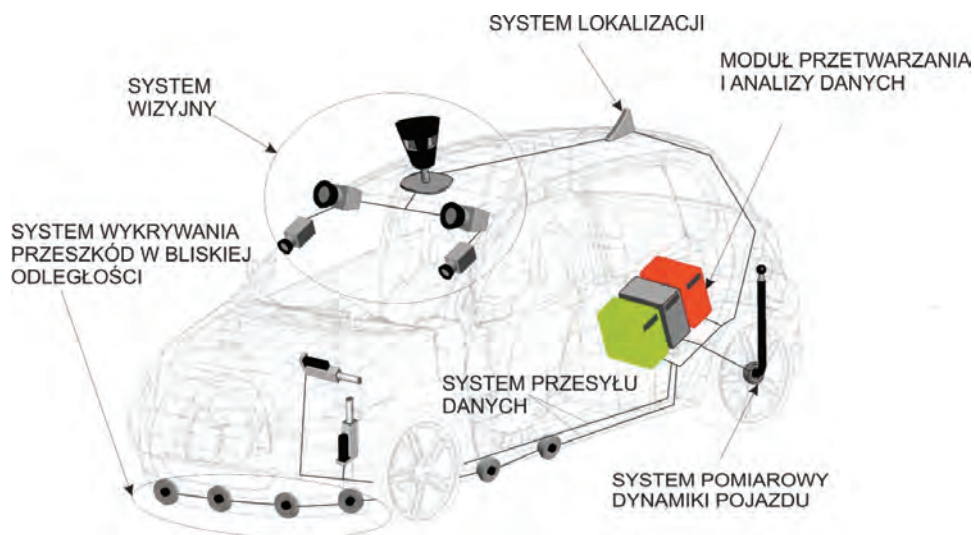
2. SYSTEM KOMUNIKACJI Z OTOCZENIEM

System komunikacji z otoczeniem pojazdu autonomicznego składa się z kilku podsystemów, których połączenie i odpowiednia synchronizacja umożliwia jego pełną funkcjonalność.

Podsystemy systemu komunikacji z otoczeniem:

- System wizyjny;
- System wykrywania przeszkód w bliskiej odległości;
- System lokalizacji;
- System pomiarowy dynamiki pojazdu;
- Moduł śledzenia obiektów ruchomych;
- System przesyłu danych;
- System przetwarzania i analizy danych.

Elementy składowe systemu komunikacji z otoczeniem zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Elementy wchodzące w skład systemu komunikacji z otoczeniem w pojeździe autonomicznym [1]

Projektując wymienione podsystemy ważne jest, aby zwrócić uwagę na protokoły komunikacyjne poszczególnych zespołów i podzespołów systemów. Ujednolicenie standardów komunikacji umożliwi dużo sprawniejszy montaż, zmniejszenie kosztów całego układu poprzez pominięcie różnego rodzaju adapterów oraz dodatkowych urządzeń oraz emulatorów. Preferowany system przesyłu danych opiera się na złączach typu PoE – *Power over Ethernet*, które to pozwalają za pomocą jednego przewodu przysłać dane w obu kierunkach oraz pełnić funkcję zasilania urządzenia w energię elektryczną.

Opis podsystemów systemu komunikacji z otoczeniem:

System wizyjny – system składający głównie z kamer oraz z lidarów, którego celem jest wykrywanie innych pojazdów, rozpoznanie znaków drogowych oraz sygnalizacji świetlnej oraz przeszkód ruchomych oraz statycznych w odległości większej niż 5m od krawędzi bocznych pojazdu.

System wykrywania przeszkód w bliskiej odległości – system, w którego skład wchodzi czujniki ultradźwiękowe, dalmierze laserowe oraz opcjonalnie radary małego zasięgu, którego celem jest wykrywanie przeszkód w najbliższym otoczeniu pojazdu w odległości mniejszej niż 5 m od krawędzie bocznych pojazdu.

System lokalizacji – jest to dokładny system pozycjonowania składający się z urządzeń systemu GPS oraz/lub GLONAS oraz odpowiednich filtrów poprawiających jego dokładność. Celem działania systemu jest dostarczanie informacji o dokładnym położeniu pojazdu.

System pomiarowy dynamiki pojazdu – jego zadaniem jest dostarczenie informacji o pojeździe, jego prędkości, aktualnym przyśpieszeniu, położeniu kątowym osi pojazdu względem osi jezdni, oraz kierunku jazdy. Zadania te są realizowane poprzez czujniki inercyjne, które składają się z akcelerometrów, żyroskopów oraz magnetometru.

Moduł śledzenia obiektów ruchomych – jest to moduł składowy systemu wizyjnego, którego zadaniem jest wykrycie obiektów poruszających się w otoczeniu pojazdu oraz śledzenie ich ruchu oraz w kolejnym etapie przewidywania ich trasy w celu zapewnienia synchronizacji jazdy autonomicznej z innymi pojazdami i obiektami ruchomymi na drodze.

System przesyłu danych – system komunikacji między urządzeniami poszczególnych podsystemów a jednostką analizującą i przetwarzającą dane. Najczęściej oparty o standardy komunikacji sieci komputerowych. Może zawierać urządzenia typu HUB i być oparty na połączeniach typu PoE.

System przetwarzania i analizy danych – komputer lub komputery o stosunkowo dużej mocy obliczeniowej, na którym/których działa główny program sterujący pojazdem autonomicznym a dane otrzymane z czujników są tymczasowo magazynowane, przetwarzane i poddawane analizie w celu wygenerowania decyzji o kolejnych manewrach pojazdu.

Rysunek 2 przedstawia schemat przepływu danych między systemem komunikacji z otoczeniem w odniesieniu do pozostałych elementów pojazdu autonomicznego,

schemat przedstawia drogę, jaką przebywają informacje od urządzeń wizyjnych do urządzeń wykonawczych.



Rys. 2. Schemat przepływu danych między systemem komunikacji z otoczeniem a urządzeniami wykonawczymi

3. WYBRANE SCENARIUSZE JAZDY – OBSZARY POKRYCIA

3.1. ZBLIŻANIE SIĘ DO SKRZYŻOWANIA

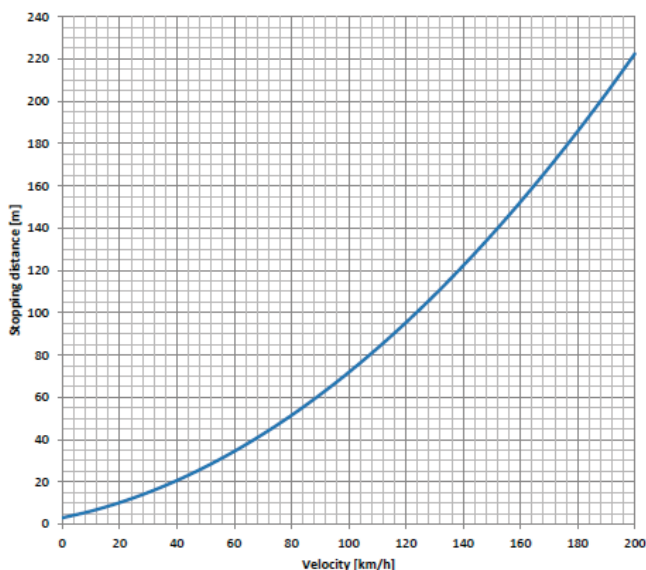
Kiedy rozważany jest przejazd przez skrzyżowanie najważniejszymi parametrami użytych urządzeń detekcyjnych są: zasięg i kąt pola widzenia czujnika. Zakładając, że:

$$t_a + t_b = 1[s], \quad (1)$$

gdzie:

t_a – czas od wykrycia zagrożenia do wykonania reakcji,

t_b – czas od rozpoczęcia reakcji do zbudowania pełnego ciśnienia w układzie hamulcowym.

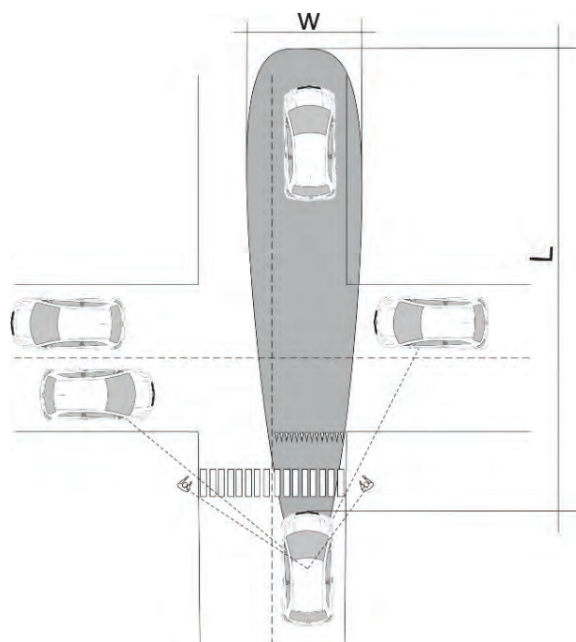


Rys. 3. Zależność drogi hamowania od prędkości dla pojazdu Toyota Yaris 2001 [2]

Znając prędkość nadjeżdżających pojazdów oraz pojazdu autonomicznego, możliwe jest oszacowanie zasięgu czujników.

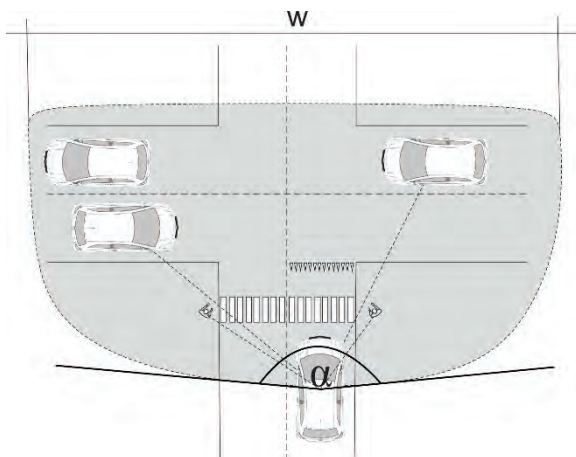
Na rysunku 3 zaprezentowano zależność między prędkością pojazdu a drogą hamowania. Poniższy wykres został wygenerowany bez wzięcia pod uwagę współczynnika bezpieczeństwa, a w obliczeniach został uwzględniony bufor bezpieczeństwa o wartości 3 m.

W nawiązaniu do danych przedstawionych na rys. 3 długość L dla detektorów dalekiego zasięgu, których zadaniem jest wykrywanie obiektów przed pojazdem autonomicznym zależy bezpośrednio od maksymalnej prędkości samochodu. Szerokość pola widzenia w omawianego detektora powinna być równa, co najmniej szerokości pasa ruchu. Rysunek 4 przedstawia pole widzenia detektora dalekiego zasięgu wymagane do pokonania przykładowego skrzyżowania.



Rys. 4. Pole widzenia detektora dalekiego zasięgu na przykładowym skrzyżowaniu

Kąt pola widzenia kolejnego detektora wchodzącego w skład systemu powinien być jak najbliższy wartości 180° . Jego celem jest wykrywanie obiektów po obu stronach skrzyżowania włączając pobocza i chodniki. Wraz ze wzrostem szerokości pola widzenia w szybkość reakcji pojazdu autonomicznego znajdującego się przed skrzyżowaniem na nadjeżdżający pojazd zwiększy się. Innymi słowy system przetwarzający i analizujący dane będzie miał więcej czasu na generowanie decyzji o kolejnych manewrach. Rysunek 5 przedstawia pole widzenia detektora szerokokątnego wymagane do pokonania przykładowego skrzyżowania.



Rys. 5. Pole widzenia detektora szerokokątnego na przykładowym skrzyżowaniu

Podczas zbliżania się do skrzyżowania szerokość pola widzenia jest najważniejszym czynnikiem. Detektory wchodzące w skład systemu komunikacji z otoczeniem muszą być w stanie wykryć pojazdy nadjeżdżające z obu stron skrzyżowania jak i inne przeszkody w tym pieszych znajdujących się na chodnikach, przejściach dla pieszych i poboczach. Wraz ze wzrostem szerokości pola polepsza się skuteczność i bezpieczeństwo działania systemu.

3.2. PRZEJAZD PRZEZ SKRZYŻOWANIE [3]

Podczas przejazdu przez skrzyżowanie bezkolizyjne odpowiednie rozpoznanie sygnalizacji świetlnej oraz znaków drogowych połączone z rozpoznaniem osi pasa ruchu będzie wystarczające do jego pokonania. Oczywistym jest konieczność wykrycia innych pojazdów i obiektów w otoczeniu pojazdu autonomicznego.

Ten sam manewr na skrzyżowaniu kolizyjnym to zupełnie odmienne zadanie. Obie strony skrzyżowania powinny być poryte przez pole widzenia detektorów. System komunikacji z otoczeniem powinien również wykrywać prędkość nadjeżdżających pojazdów oraz śledzić ich ruch. Specjalnie zaprojektowany algorytm powinien obliczać czasy dojazdu wszystkich pojazdów znajdujących się na skrzyżowaniu do punktu kolizji z pojazdem autonomicznym na jego zaplanowanej trasie przejazdu.

Czas do kolizji jest obliczany za pomocą wzoru:

$$t_c = t_y + t_{e(i,j)} - t_{d(i,j)}, \quad (2)$$

1. Dla skrzyżowania z sygnalizacją świetlną i możliwą kolizją:

t_y – czas trwania sygnału żółtego lub czas od końca sygnału czerwonego do początku sygnału zielonego,

$t_{e(i,j)}$ – czas ewakuacji strumienia i z obszaru kolizji ze strumieniem j ,

$t_{d(i,j)}$ – czas dojazdu strumienia j do obszaru kolizji ze strumieniem i .

2. Dla skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej oraz o ruchu okrężnym $t_y = 0$, a równanie przyjmuje postać:

$$t_c = t_{e(i,j)} - t_{d(i,j)}. \quad (3)$$

Kiedy prędkość nadjeżdżających obiektów jest oszacowana oraz ich trasy przejazdu zamodelowane wtedy może zostać przeprowadzona operacja obliczania czasu potrzebnego na bezpieczne opuszczenie skrzyżowania:

$$t_e = \frac{S(i,j) + l_i}{V_i}, \quad (4)$$

S_i – długość trasy jaką przejedzie obiekt i do miejsca kolizji z obiektem j [m],

V_i – aktualna prędkość obiektu i $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$,

L_i – długość obiektu (pojazdu) i [m].

Czas dojazdu obiektów ze strumienia j do punktu kolizji z obiektem ze strumienia i może być oszacowana, jeśli znana jest prędkość nadjeżdżających pojazdów oraz ich odległość od punktu kolizji:

$$t_d = \frac{S(i,j)}{V_i} + 1. \quad (5)$$

Kiedy pojazdy czekają przed skrzyżowaniem (kolejkowanie), wtedy czas dojazdu wnosi:

$$t_d = \sqrt{\frac{2 \times [S(i,j) + 1,5]}{a_j}}, \quad (6)$$

$$t_s = \frac{S_p + l_i}{V_i}, \quad (7)$$

Czas potrzebny na bezpieczne opuszczenie skrzyżowania (rys. 6):

S_p – długość trasy pojazdu z punktu startowego do punktu bezpieczeństwa p [m],

V_i – aktualna prędkość obiektu (pojazdu) i $\frac{\text{m}}{\text{s}}$,

l_i – długość obiektu (pojazdu) i [m].

Decyzja o przejechaniu przez skrzyżowanie może zostać podjęta na bazie obliczeń przedstawionych powyżej, jeśli:

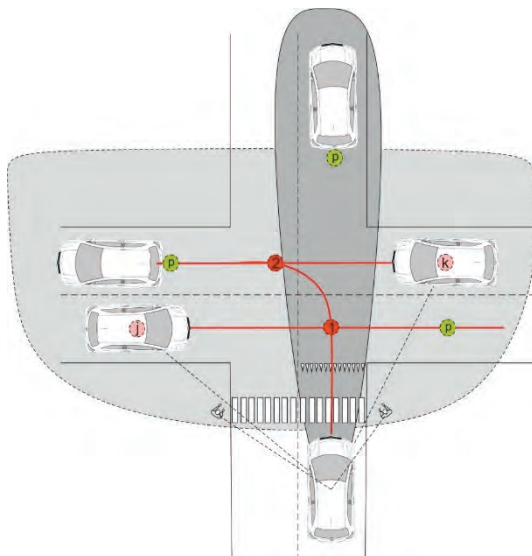
$$t_s(i, j \dots n) \leq \sum t_{c(i, j-n)} + t_b, \quad (8)$$

t_c – czas do kolizji z obiektami $j \dots n$,

t_s – czas potrzebny do bezpiecznego opuszczenia skrzyżowania,

t_b – bufor bezpieczeństwa.

System wygeneruje decyzję o wjeździe na skrzyżowanie.



Rys. 6. Przykładowa sytuacja na skrzyżowaniu
(p – punkt bezpieczeństwa, 1 – punkt kolizji z obiektem j , 2 – punkt kolizji z obiektem k).



Rys. 7. Schemat blokowy algorytmu decyzyjnego – dla przejazdu przez skrzyżowanie

Odpowiednio zaprojektowany system komunikacji z otoczeniem wraz z inteligentnym oprogramowaniem sterującym są podstawą do bezpiecznego poruszania się pojazdów autonomicznych po drogach publicznych. Ich zadaniem jest bardzo szybkie zbieranie informacji o otoczeniu pojazdu i ich analiza na podstawie, której decyzje o dalszych ruchach mogą być podejmowane. Rysunek 7 przedstawia schemat blokowy algorytmu decyzyjnego dla przykładowej sytuacji na skrzyżowaniu – jak na rys. 6.

Powyższy schemat przedstawia jedynie niewielką część bardzo rozbudowanego i wielowątkowego oprogramowania. Dane, które muszą być przetwarzane przez oprogramowanie będą bardzo zróżnicowane. Rodzaj danych zależy będzie od rodzaju użytych czujników. Największe partie danych pochodzą będą ze strumieni wideo z obsługiwanych kamer służących do rozpoznawania znaków i sygnalizacji świetlnej. W przypadku zastosowania urządzenia typu lidar wymagana będzie jeszcze większa moc obliczeniowa. Przed wyborem sprzętu komputerowego do obsługi systemu autonomicznego pojazdu zaleca się oszacować wymaganą moc obliczeniową. Stosowane będzie wyposażenie pojazdu w sprzęt o 130% wymaganej mocy obliczeniowej, aby uniknąć zawieszania systemu i jego przeciążania. Przeciążenie układu może powodować opóźnienie w transmisji danych, które finalnie prowadzą do tworzenia niebezpiecznych sytuacji na drodze.

4. WNIOSKI

Obszary pokrycia dla systemu komunikacji z otoczeniem silnie zależą od maksymalnej prędkości, z jaką ma poruszać się projektowany pojazd. Należy dobierać urządzenia w taki sposób, aby pozwalały one na wykrycie przeszkody w odpowiednio dużej odległości przed pojazdem pozwalając w ten sposób na bezpieczne zatrzymanie pojazdu lub ominięcie obiektu. W przypadku zbliżania się do skrzyżowania kluczowe będą parametry takie jak: kąt widzenia detektora oraz szerokość pola widzenia, pozwalające na odpowiednio szybkie wykrycie pojazdów zbliżających się do obszarów prawdopodobnej kolizji. Urządzeniem spełniającym te kryteria jest lidar 3D pozwalający na skanowanie otoczenie dookoła pojazdu i podający informacje obiektach w formie trójwymiarowej chmury punktów. Aczkolwiek jest to rozwiązanie o wygórowanej cenie i ze względu na to na obecną chwilę niemające możliwości implementacji w pojazdach produkowanych seryjnie. Dlatego też należy poszukiwać rozwiązań alternatywnych, tu dużą szansą mogą być systemy wizyjne oparte na specjalnej technice obrazowania – stereoskopii, która oprócz koloru i kształtu obiektów daje informacje o ich zależnościach przestrzennych i odległości od detektora.

LITERATURA

- [1] ŻELAZNY Z., *Conceptual design of autonomous vehicle*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2013.
- [2] SAWICKI P., *Conceptual design of communication systems with environment in autonomous vehicle*, praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2013.
- [3] Załącznik nr 3 do rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r., Dz.U. nr 220, poz. 2181.

*konstrukcje dla pojazdów przyszłości,
monocoque, silnik bezszczotkowy, pojazd elektryczny,
akumulatory litowo-jonowe, układ napędowy*

Zbigniew ŻELAZNY*

PROJEKT KONCEPCYJNY LEKKIEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

Artykuł prezentuje koncepcję czterokołowego pojazdu elektrycznego opartego na konstrukcji nośnej typu MONOCOQUE, wykonanej z materiałów kompozytowych, i napędzanego bezszczotkowymi, bezprzekładniowymi silnikami elektrycznymi prądu stałego, znajdującymi się w piastach kół, zasilanego energią elektryczną magazynowaną w ogniwach litowo-jonowych. Szczególną uwagę w artykule poświęcono zapotrzebowaniu na moc oraz moment obrotowy dla układu napędowego. Konstrukcja pojazdu jest alternatywą dla obecnych na rynku pojazdów segmentu A.

1. WSTĘP

Średnia liczba osób przewożonych pojazdami osobowymi wynosi 1,6 osoby na pojazd [1]. Bardzo często zdarza się, że użytkownicy podróżują w pojedynkę czter- lub 5-miejscowym pojazdem. Ładowność samochodu jest rzadko wykorzystywana w pełni. Podane fakty nasuwają wniosek, iż pojazdy powinny zostać przeprojektowane na takie, które posiadają jedno lub dwa miejsca dla kierowcy i pasażera. Zmniejszając gabaryty pojazdu, a co za tym idzie – masę, automatycznie zmniejsza to zużycie paliwa oraz emisję szkodliwych substancji. Użycie do napędu alternatywnych źródeł energii dodatkowo ograniczyłoby negatywny wpływ pojazdów na środowisko.

2. LEKKI POJAZD ELEKTRYCZNY

Z założenia pojazd ma służyć do przewozu jednej osoby. Masa własna nie może przekraczać 200 kg. Konstrukcja powinna mieć jak najkorzystniejszy współczynnik aerodynamiczny C_x . Napęd pojazdu realizowany będzie poprzez użycie bezszczotkowych silników prądu stałego umieszczonych w piastach kół pojazdu. Energia potrzeb-

* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Pojazdów i Robotów Mobilnych, Polska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

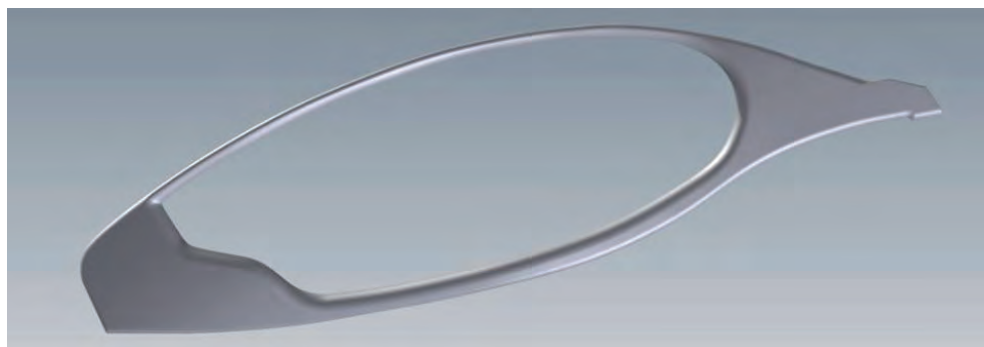
na do zasilenia układu napędowego pochodzić będzie z akumulatorów litowo-jonowych, posiadających bardzo korzystny stosunek pojemności do masy. Zakładana prędkość maksymalna pojazdu to 90 km/h.



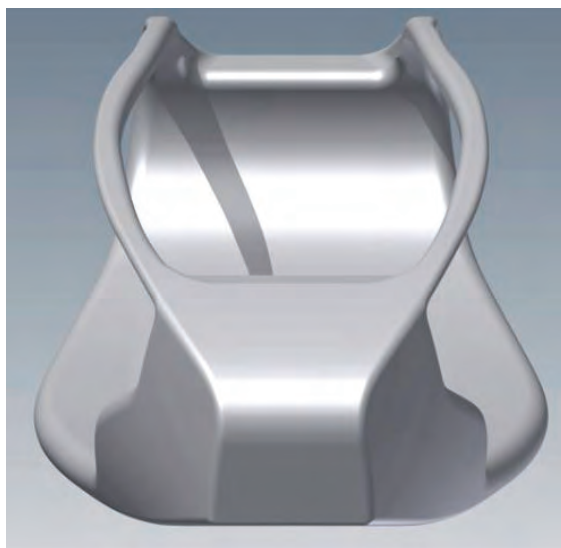
Rys. 1. Wizualizacja koncepcji pojazdu elektrycznego

2.1. KONSTRUKCJA NOŚNA POJAZDU

Konstrukcja nośna wykonana z materiałów kompozytowych, tj. włókien węglowych oraz żywicy epoksydowej. Monocoque wykonany z tych materiałów zapewni wystarczające właściwości wytrzymałościowe przy zachowaniu niskiej masy. Koncepcja konstrukcji nośnej pojazdu została przedstawiona na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Rzut boczny konstrukcji nośnej pojazdu

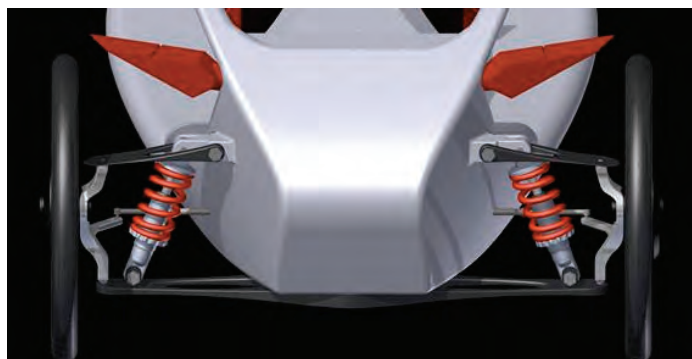


Rys. 3. Rzut z przodu konstrukcji nośnej pojazdu

Konstrukcja nośna zwężona z przodu pojazdu umożliwia montaż niezależnego dwuwahaczowego zawieszenia dla każdego z przednich kół. Tylne części pojazdu zostały celowo uniesione w celu instalacji elementów zawieszenia tylnego w postaci wahacza zbliżonego konstrukcją do wahaczy motocyklowych lub stosowanych w pojazdach typu quad.

2.2. ZAWIESZENIE POJAZDU

Tylne zawieszenie pojazdu jest zawieszeniem typu motocyklowego. Wahacz połączony z konstrukcją nośną, z możliwością obrotu w osi tulei mocujących, amortyzowany jest tłumikiem hydraulicznym wraz ze sprężyną. Oś łącząca tylne koła pojazdu



Rys. 4. Zawieszenie przednie pojazdu

– wahacze wykonane z materiałów kompozytowych wraz z amortyzatorem

2.3. UKŁAD NAPĘDOWY

Układ napędowy stanowią 4 silniki elektryczne prądu stałego umieszczone w piastach kół pojazdu. Silniki typu HUB. Każdy o mocy 1000 W, maksymalnym momencie obrotowym 70 Nm i masie 6,5 kg. Zasilane są napięciem 48 V z baterii litowo-jonowych. Posiadają wbudowane sterowniki elektroniczne oraz wewnętrzny układ chłodzenia. Rysunek 5 prezentuje konstrukcję silnika typu HUB.



Rys. 5. Schemat budowy silnika typu HUB [2]

2.3.1. ZAPOTRZEBOWANIE NA MOC DLA UKŁADU NAPĘDOWEGO

Podstawowe dane pojazdu zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe dane pojazdu

| Parametr | Wartość | Jednostka | Opis |
|---------------------|---------|-----------|------------------------------|
| V_{\max} | 90 | km/h | Prędkość maksymalna |
| m_1 | 200 | kg | Masa własna pojazdu |
| m_2 | 150 | kg | Ładowność |
| Wheel \varnothing | 508/20" | mm/in | Średnica koła |
| A | 1,03 | m^2 | Powierzchnia czołowa pojazdu |

Wymagana siła napędowa przy zadanej masie własnej i ładowności – obliczenia:

$$V_{\max} = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

Opory ruchu pojazdu:

$$F_R = F_f + F_s + F_a + F_1 \quad (2)$$

F_R – sumaryczne opory ruchu,

F_f – opory toczenia,

F_s – opory wzniesienia,

F_a – opory powietrza,

F_i – opory związane z bezwładnością elementów pojazdu.

$$F_f = G \times f \quad (3)$$

$$G = (m_1 + m_2) \times g \quad (4)$$

$$f = 0,013 \quad (5)$$

f – współczynnik tarcia między kołami a jezdnią – wartość uśredniona.

$$F_s = G \times \sin \alpha \times f \quad (6)$$

F_i – pominięte w tym przypadku.

$$F_a = \frac{1}{2} d * A * Cx * V^2 \quad (7)$$

d – gęstość powietrza – 1,226 kg/m³,

A – pole powierzchni czołowej pojazdu,

Cx – współczynnik aerodynamiczny,

V – prędkość pojazdu.

$$F_F = F_f + F_s + F_a \quad (8)$$

$$F_R = (m_1 + m_2) \times g \times f + (m_1 + m_2) \times g \times \sin 45^\circ \times f \quad (9)$$

$$F_R = (200 \text{ [kg]} + 150 \text{ [kg]}) \times 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \times 0,013 + (200 \text{ [kg]} + 150 \text{ [kg]}) \times 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \times 0,7 \quad (10)$$

$$F_R = 44,63 \text{ [N]} + 31,24 \text{ [N]} + 2,99 \text{ [N]} \quad (11)$$

$$F_R = 78,86 \text{ [N]} \quad (12)$$

Sumaryczna siła wymagana do pokonania oporów ruchu wynosi **78,86 [N]**.

Wymagana moc silników elektrycznych:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (13)$$

$$P(t) = F \times v \quad (14)$$

$$F - \text{siła} \quad (15)$$

$$P(t) = \tau \times \omega \quad (16)$$

v – prędkość pojazdu,

τ – moment obrotowy,
 ω – prędkość kątowna.

$$P = F \times v \quad (17)$$

$$P = 78,86 [\text{N}] \times 25 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = 1971,5 \left[\frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (18)$$

$$P \approx 2000 [\text{W}] \quad (19)$$

Należy również uwzględnić sprawność silników, ze względu na fakt, iż są silnikami bezprzekładniowymi – nie ma strat na przełożeniach.

\mathcal{G}_m – sprawność silników.

Teoretyczna sprawność bezszczotkowych silników prądu stałego wynosi 85–95%. Do obliczeń została przyjęta najniższa wartość – 85% dla czterech silników.

$$\mathcal{G}_m = 85$$

Sumaryczna moc wymagana do napędzenia pojazdu wynosi:

$$2000 [\text{W}] \times \frac{100}{85} \times \frac{100}{85} \times \frac{100}{85} \times \frac{100}{85} = 2000 \times 1,87 [\text{W}] \approx 3747 [\text{W}] \quad (20)$$

Wymagana prędkość obrotowa:

Pojazd jest wyposażony w koła o średnicy $20'' = 508 \text{ mm}$ i ma rozwijać prędkość $90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$.

$$L = 2\pi r = \varnothing\pi \quad (21)$$

$$L = 0,508 [\text{m}] \times 3,14 = 1,595 [\text{m}] \quad (22)$$

$$\omega = \frac{25}{1,595} = 15,67 \left[\frac{\text{rot}}{\text{s}} \right] \quad (23)$$

$$15,67 \left[\frac{\text{rot}}{\text{s}} \right] \times 60 \approx 940 [\text{RPM}] \quad (24)$$

$$\varnothing \text{ koła} = 508 [\text{mm}] = 0,508 [\text{m}]$$

Minimalna prędkość obrotowa kół powinna wynosić 940 obrotów na minutę.
 Wymagany moment obrotowy:

$$P(t) = \tau \times \omega \quad (25)$$

$$P_W = \tau_W \times \omega \quad (26)$$

$$\tau_W = \frac{P_W}{\omega} \quad (27)$$

P_W – moc na kołach [W],

τ_w – moment na kołach [Nm],

ω – prędkość kątowna kół $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$.

$$\tau_w = \frac{3747 [\text{W}]}{15,67 \left[\frac{\text{rot}}{\text{s}} \right] \times 2\pi} = \frac{3747 [\text{W}]}{98,40 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]} = 38,07 \left[\frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{s}^2} \times \text{s} \rightarrow \frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{s}^2} \rightarrow \text{Nm} \right] \quad (28)$$

$$\tau_w = 38,07 [\text{Nm}] \quad (29)$$

Minimalny moment obrotowy kół powinien wynosić 38,07 Nm.

3. PODSUMOWANIE

Przy założeniu masy pojazdu nieprzekraczającej 200 kg oraz łącznej masy kierowcy i bagażu, sumaryczna moc silników 4000W jest wystarczająca do poruszania się pojazdem z prędkością do 90 km/h. Minimalny moment obrotowy, potrzebny do osiągnięcia tego celu, wynosi 38,07 Nm dla każdego z napędzanych kół przy prędkości obrotowej rzędu 1000 obrotów na minutę. Dzięki zastosowaniu lekkiej konstrukcji z tworzyw sztucznych oraz baterii litowo-jonowych o bardzo korzystnym stosunku pojemności do masy, udało się osiągnąć założone parametry pojazdu przy zużyciu energii elektrycznej na niskim poziomie. Tego typu konstrukcje mogą być alternatywą dla pojazdów spalinowych z segmentu A. Przy zbliżonych osiągnięciach generują dużo niższy koszt przejechania 100 km dla finalnego użytkownika oraz, co ważne, niski poziom emisji CO₂.

LITERATURA

- [1] Summary of Travel Trends: 2009, National Household Travel Survey.
- [2] IN-WHEEL ELECTRIC MOTORS; The Packaging and Integration Challenges Alexander Fraser Senior.

