

doi:10.15199/48.2022.09.63

## Projekt i budowa wózka inwalidzkiego o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopoziomowania siedziska

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono nową wersję wózka inwalidzkiego, która powstała jako realizacja kilku prac inżynierskich na Politechnice Krakowskiej w ramach konkursu FutureLab. Dostępne aktualnie rodzaje wózków inwalidzkich nie umożliwiają osobom dotkniętym niepełnosprawnością poruszania się w każdym terenie. W celu uzyskania możliwości jazdy po terenach takich jak plaża, las, ale również dywan, alejki w sklepie, zdecydowano się na zastosowanie gąsienicowego układu napędowego, który dodatkowo swoimi wymiarami nie może przekroczyć szerokości drzwi. Ponadto zastosowano system niezależnego poziomowania siedziska, który pozwala na przechył siedziska w dwóch osiach. Dzięki wykorzystaniu czujników pochylenia system na bieżąco monitoruje i dokonuje korekty pochyłu poziomując siedzisko niezależnie od krzywizny terenu. Wózek został dodatkowo wyposażony w system nadzoru energii BMS.

**Abstract.** The article presents a new version of the wheelchair, which was created as the implementation of several engineering works at the Cracow University of Technology as part of the FutureLab competition. The types of wheelchairs currently available do not allow people with disabilities to move around in any terrain. In order to be able to drive on areas such as the beach, forest but also carpet, alleys in the store, it was decided to use a tracked drive system, which additionally with its dimensions can not exceed the width of the door. In addition, an independent seat leveling system is used, which allows the seat to be tilted in two axes. Thanks to the use of inclination sensors, the system monitors and corrects the inclination on an ongoing basis, leveling the seat regardless of the curvature of the terrain. The trolley has been additionally equipped with the BMS energy monitoring system. (**Design and construction of a wheelchair with a caterpillar drive with a seat auto-leveling system**)

**Słowa kluczowe:** elektryczny wózek inwalidzki, napęd gąsienicowy, system autopoziomowania siedziska, sterowanie wózkiem inwalidzkim.

**Keywords:** electric wheelchair, tracked drive, seat auto-leveling system, wheelchair control.

### Wstęp – przegląd literatury

Temat wózków inwalidzkich dotyczy zagadnienia pomocy ludziom z wszelkimi niepełnosprawnościami ruchowymi. Pierwsze doniesienia o urządzeniu, które ułatwiało przemieszczenie się osobom niepełnosprawnym na krześle dzięki dodaniu do niego kółek, pojawiło się w około roku 500 p.n.e. Wózek zbudowany na tej samej zasadzie został wykonany w czasach nowożytnych dla króla Hiszpani Filipa II (rys. 1), jak również w 1640 r. dla króla Polski Władysława IV Wazy. Stanowił on udogodnienie dla opiekunów, a nie osoby niepełnosprawnej [1, 3].



Rys. 1. Wózek inwalidzki Filipa II króla Hiszpani [3]

Dopiero w XVII w. pojawiły się wózki umożliwiające osobie niepełnosprawnej samodzielne ich użytkowanie – przemieszczanie się. Były to różne konstrukcje skomplikowane w obsłudze i wymagające od użytkownika znacznej siły rąk [2, 3].

Rozwój wózków jest ściśle uzależniony od postępu technologii, dlatego w XX w. zaczęły się pojawiać wózki zarówno z lżejszych materiałów, jak i te wykorzystujące

napęd elektryczny (pierwszy zasilany z akumulatorów został skonstruowany w 1903 r.) [1, 2, 4].

W dzisiejszych czasach wózki inwalidzkie mają ergonomiczny kształt, są lekkie i praktyczne, a co najważniejsze – pozwalają na w pełni samodzielne korzystanie z ich możliwości. Istnieje wiele rozwiązań, co pozwala na wybranie odpowiedniego dla siebie wózka – od tanich, lekkich napędzanych siłą własnych rąk, poprzez wózki o napędzie z silników elektrycznych aż po specjalistyczne np. do przemieszczenia się w nieutwardzonym terenie [4, 5, 6].

Pomimo wielu różnych rozwiązań, nie odnaleziono uniwersalnego wózka, który pozwoliłby na przemieszczanie się zarówno w domu (małych rozmiarów), po lesie (zamiast kół, gąsienice) oraz zapewniającego komfort pionowego siedzenia niezależnie od ukształtowania gruntu, co między innymi pozwoliłoby na jazdę po schodach. Autorzy postanowili w niniejszej publikacji przedstawić autorski prototyp wózka inwalidzkiego.

### Założenia projektowe

Przed skonstruowaniem nowego bardziej uniwersalnego wózka inwalidzkiego przeanalizowano istniejące rozwiązania oraz skonsultowano się z zainteresowanymi osobami. Działania te pozwoliły na stworzenie zbioru wymagań, które przedstawiono poniżej:

- Napęd elektryczny.
- Poruszanie się w różnym terenie.
- Możliwość poruszania się w alejkach sklepowych i przejazd przez drzwi w domu.
- Jazda po schodach oraz wjazd na krawężniki chodnikowe.
- Zapewnienie odpowiedniego pochylenia siedziska niezależnie od terenu.
- Tłumienie wybojów.
- Prędkość jazdy niezależna od terenu.
- System informujący o zasięgu.

Na kolejnym etapie projektu zostaną uwzględnione dodatkowe aspekty m.in. oświetlenie i podnóżek.

Na podstawie tych wymagań przyjęto poniższe założenia:

- Szerokość projektowanego wózka nie powinna przekraczać 75 cm – minimalna odległość między regałami [7] a najlepiej 70 cm, gdyż można spotkać ościeżnice drzwiowe o takiej szerokości.
- Zawracanie powinno odbywać się w miejscu o szerokości mniejszej niż 1 m, wynika to z minimalnej szerokości alejek w małych sklepach samoobsługowych [8].
- Zastosowanie gąsienicowego układu bieżnego, który pozwoli na jazdę w różnych warunkach a w przypadku, gdy będzie wystawać przed stelaż wózka jednocześnie umożliwi wjazd na wysokie przeszkody w tym schody.
- Zastosowanie elektrycznych siłowników do poziomowania siedziska, zdecydowano się na poziomowanie w dwóch płaszczyznach, gdyż z krawężnika również można zjechać pod kątem a nie tylko na wprost.
- Użycie silników typu BLDC zapewniając stały moment niezależnie od prędkości.
- Układ pomiarowy BMS do nadzoru stanu baterii oraz informacji o zasięgu.
- Osiągnięcie prędkości porównywalnej do elektrycznych wózków inwalidzkich ~7 km/h.
- Ze względów na ograniczony budżet wykonanie prototypu z powszechnie dostępnych tańszych części.
- Jednostką sterującą będzie Raspberry Pi 4.
- Zastosowanie zespołu baterii dających znamionowe napięcie 48 V<sub>DC</sub>, wynikające z dobranych silników.

Uwzględniając wszystkie wymienione założenia w programie Fusion 360 firmy Autodesk zamodelowano wózek inwalidzki o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopozymowania siedziska, przedstawiony na rys. 2. Jak widać na tym rysunku, możemy go podzielić na dwie części dolną – napędową oraz górną – siedzisko, z siłownikami. W przedstawionym modelu nie uwzględniono sterowników i przewodów. Wykonanie modelu pozwoliło na weryfikację rozmieszczenia komponentów przy zachowaniu wymiaru szerokości i długości, wynoszącą 70x70 cm. Stelaż wózka został oparty na profilach aluminiowych 30x30, a wytrzymałość konstrukcji została również zweryfikowana symulacyjnie. Program Fusion 360 pozwolił na weryfikację kątów pochylenia siedziska, przy uwzględnieniu m.in. zakresu pracy siłowników. Dodatkowo możliwość odczytu masy zarówno całego wózka jak i poszczególnych jego komponentów, przyczyniła się do bardziej precyzyjnych obliczeń związanych z doborem kluczowych elementów – silników i siłowników.



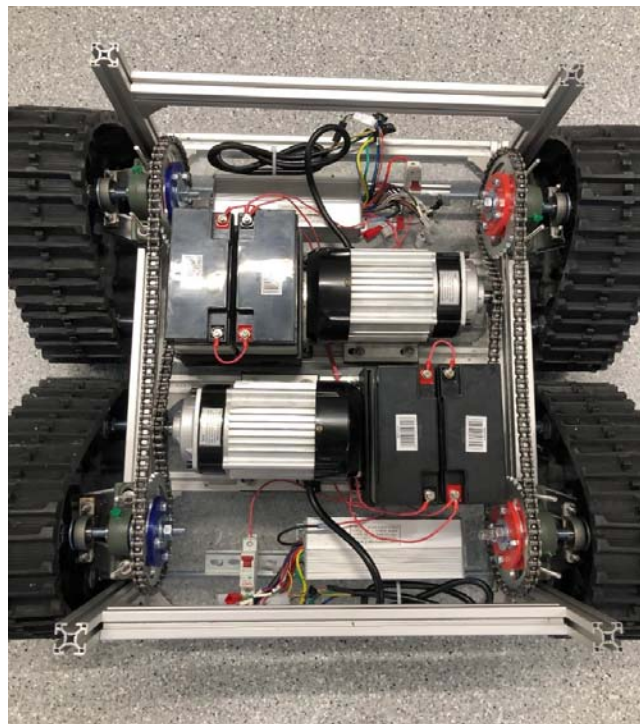
Rys. 2. Model wózka inwalidzkiego o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopozymowania siedziska wykonany w programie Fusion 360

W następnych dwóch rozdziałach artykułu skupiono uwagę odpowiednio na układzie napędowym oraz systemie poziomowania. Następnie jako zakończenie przedstawiono wykonane wstępne testy potwierdzające przyjęte założenia projektowe.

### Napęd gąsienicowy

W poprzednim rozdziale wskazano, że istotnym założeniem jest możliwość przemieszczania się w terenach o różnym ukształtowaniu, dlatego zdecydowano się na zastosowanie gąsienicowego układu bieżnego. Dla potrzeb zmniejszenia wymiaru gabarytowych zastosowano najmniejsze dostępne gąsienice, które z tego powodu zostały podwojone na każdej ze stron w celu zapewnienia maksymalnego styku z podłożem na długości wózka. Dodatkowo gumowa gąsienica wystaje poza stelaż wózka, umożliwiając tym samym najazd na pionowe przeszkody. Tak skonstruowany układ bieżny zapewnia możliwość poruszania się w dowolnym terenie: na szlakach górskich, alejkach sklepowych, schodach itp.

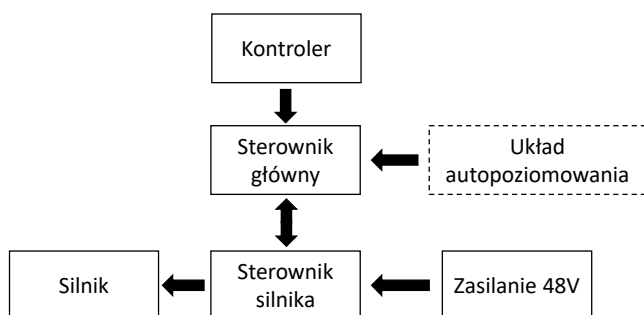
Układ napędowy to nie tylko gąsienice, ale także przekładnie, silniki i system zasilania. W projekcie zwrócono uwagę na umieszczenie większości elementów jak najniżej, tym samym obniżając położenie środka ciężkości. Rozmieszczenie części jest symetryczne, co przekłada się na stabilniejszy ruch. Sposób rozlokowania elementów układu napędowego w dolnej części konstruowanego wózka inwalidzkiego został przedstawiony na rys. 3. Dzięki wykonanym uprzednio modelom komputerowym opracowany wózek inwalidzi ma szerokość oraz długość wynoszącą 70x70 cm przy uwzględnieniu zawracania w miejscu uzyskujemy średnice zawracania 99 cm, tym samym spełniając wcześniejsze przedstawione założenia.



Rys. 3. Dolna część wózka ukazująca rozmieszczenie układu napędowego oraz zasilania

Użytkownik ma możliwość sterowania wózkiem inwalidzkim poprzez wykorzystanie uniwersalnego kontrolera podłączonego do portu USB, nadającego impulsy bezpośrednio na sterownik nadrzędny (Raspberry Pi 4). Następnie dane te zostają odpowiednio przetworzone na sygnał PWM, który jest nadawany do dedykowanego

sterownika silnika. Na tej podstawie zostajeysterowany silnik – odpowiednia prędkość obrotowa i kierunek obrotów. Ponadto algorytm sterowania napędem uwzględnia część związaną z autopoziomowaniem siedziska, po wykryciu kąta przechylnia poza zakres korekty, zostają wyłączone napędy w celu zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikowi. W takim przypadku użytkownik zobaczy stosowny komunikat i przy zredukowanej prędkości będzie mógł przemieścić się na poprzedni bardziej płaski teren. Schemat blokowy przedstawiony na rys. 4 zawiera graficzny opis algorytmu sterowania. Blok związany z silnikiem i z zasilaniem został przedstawiony w dalszej części tego rozdziału, a układu autopoziomowania opisano szczegółowo w kolejnym rozdziale.



Rys. 4. Podstawowe komponenty związane z układem napędowym przedstawione w sposób blokowy

Kwestia doboru silników była kluczowa dla projektu. Na początku założono konieczność wykorzystania dwóch silników w celu uniknięcia stosowania dodatkowych przekładni czy skrzyni biegów. Zastosowanie silników sterowanych, mogących niezależnie z różną prędkością napędzać układy bieżne po przeciwnych stornach wózka, przypomina funkcjonowanie skrętu w ciężkich maszynach gąsienicowych np. czołgu.

Większość wózków jest wyposażona w klasyczne silniki prądu stałego: wynika to m.in. z ich niskiej ceny. Z tego też powodu liczne publikacje poświęcone są poprawie sterowania takimi silnikami czy też interfejsie użytkownika [9, 10]. W naszym przypadku zależało nam na prostej implementacji gotowych rozwiązań, dlatego też zastosowano dedykowany sterownik dla silników (bez wprowadzania własnych algorytmów). Jako typ silnika wybrano silnik bezszczotkowy BLDC; czynnikiem decydującym był fakt uzyskania jak najbardziej stałego momentu obrotowego niezależnie od prędkości obrotowej [11]. Oczywiście przy doborze konkretnego silnika posłużono się powszechnie znanymi wzorami i dla założonych wartości:

- Masa wózka wynosi 160 kg, masa człowieka 95 kg, daje to łącznie 225 kg.
- Kąt przeszkody przyjęto jako maksymalny kąt pochylenia schodów wynoszący 45° [12]
- Prędkość jazdy powyżej 6 km/h, niezależnie od warunków podłoża.
- Prędkość obrotowa na wale silnika 580 obr/min, założono zakup silnika z wbudowaną przekładnią.

Po dokonaniu obliczeń i uwzględnieniu dodatkowej przekładni 0,55 (wynikającej z wielkości kół zębatach) uzyskano wymaganą moc silnika 990.5 W, wymagany moment obrotowy silnika 15,6 Nm oraz prędkość maksymalną wózka 7,5 km/h. Silnikiem spełniającym wszystkie te wymagania jest Yalu BM1412ZXF [13].

Zasilanie silników, ale również pozostałych układów w tym sterownika odbywa się z połączonych szeregowo akumulatorów tak, aby uzyskać napięcie znamionowe 48 V<sub>DC</sub>. Maksymalne zapotrzebowanie prądowe wózka

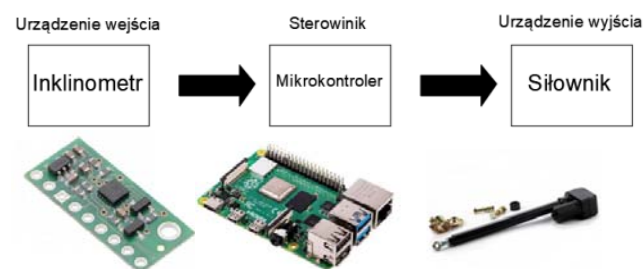
(uwzględniając dwa silniki, układ poziomowania oraz dodatkową elektronikę) wynosi 41 A przy napięciu 48 V. Uwzględniając ponadto dostępne miejsce na montaż, wybrano cztery akumulatory żelowe AGM 12 V 18 Ah.

Akumulatory zostały zamontowane w wydrukowanych uchwytach oraz dodatkowo zastosowano wkładki gumowe, które nie tylko zapewniają stabilizację, ale również dodatkowo chronią akumulatory przed drganiami.

### Układ automatycznego poziomowania

Zastosowanie układu automatycznego poziomowania przede wszystkim miało na celu poprawę poziomu bezpieczeństwa oraz komfortu użytkownika. Układ ten oparty jest na czterech siłownikach elektrycznych, które poprzezysterowanie mikrokontrolerem Raspberry Pi w zależności od usytuowania terenu odpowiednio korygują przechył siedziska tak, aby osoba użytkująca wózek w ciągu całego procesu znajdowała się pod kątem prostym względem poziomu. Zastosowane siłowniki w stopniu wystarczającym spełniają swoją funkcję, w pełni neutralizując powstałe zagrożenia oraz uczucie dyskomfortu.

Programowanie sterownika, jakim było Raspberry Pi 4 odbyło się przy pomocy języka Python. Kluczowym elementem dla działania układu jest inklinometr LSM6DS33 pełniący funkcję trójosiowego akcelerometru oraz żyroskopu [14]. Inklinometr generuje sygnały stanowiące dla sterownika informację o poziomie pochylu siedziska. Skrypt zaimplementowanych w sterowniku odpowiednio przetwarza te informacje w taki sposób, aby sygnał wyjściowy stanowił informację dla układu siłowników o potrzebie wykonania korekty układu fizycznego. Opisany proces przedstawiono na rys. 5. Jednocześnie system ten ma za zadanie zapewnić komfort użytkownikowi wózka inwalidzkiego w trakcie pokonywania potencjalnych przeszkód, czy to w formie schodów, czy też wszelkich nierówności terenowych. System poziomowania nie jest dynamiczny, lecz łagodnie koryguje pozycję siedziska. Został on zaprojektowany z myślą o poprawie jakości komfortu osób, które są zmuszone do pokonywania codziennych trudności spowodowanych barierą niepełnosprawności.



Rys. 5. Składowe elementy procesu poziomowania siedziska

### Testy

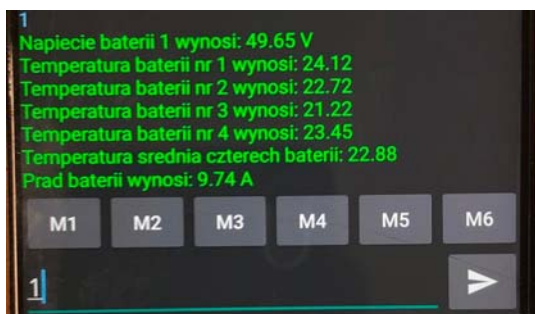
W tej części publikacji przedstawiono osiągnięty efekt, czyli sposób funkcjonowania wykonanego prototypu – wózka inwalidzkiego o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopoziomowania siedziska.

Pierwsze próby jezdne zostały przeprowadzone na płaskiej powierzchni w pomieszczeniu. Kolejną próbą było sprawdzenie czy wózek jest w stanie wjechać po schodach. Testy dowiodły, słuszność doboru układu napędowego wraz z mocą silników. Pomimo małych wymiarów w stosunku do schodów (rys. 6.) układ poziomowania utrzymywał w miarę poziomo siedzisko. Jedynym zastrzeżeniem podczas badań była dynamika działania programu, która w późniejszym czasie została naprawiona programowo.

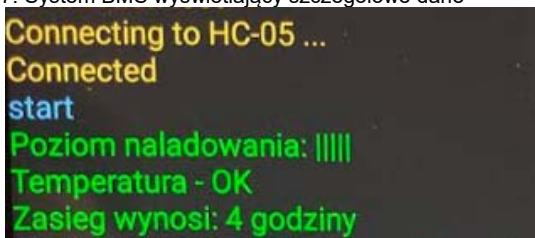




Rys. 6. Pierwsze testy na schodach



Rys. 7. System BMS wyświetlający szczegółowe dane



Rys. 8. System BMS wyświetlający pozostały czas pracy wózka

Przedstawiony prototyp jest ciągle udoskonalany: w ostatnim czasie zmieniono siedzisko (rys. 9), poprawiając komfort użytkownika, lecz jednocześnie wymusiło to obniżenie platformy autopozjomującej.



Rys. 9. Prototyp wózka inwalidzkiego o napędzie gąsienicowym wraz z systemem autopozjomowania siedziska ze zmiennym fotelem

Podczas testów sprawdzono również działanie wykonanego systemu BMS, który przesyła dane na telefon przy wykorzystaniu transmisji bluetooth. Pierwsza wersja opracowanego systemu BMS (rys. 7), podaje aktualną sumaryczną wartość napięcia oraz chwilowy pobór prądu. Dodatkowo dla celów bezpieczeństwa na każdym z akumulatorów został umiejscowiony czujnik temperatury podający wartość w °C, dla każdego akumulatora z osobna oraz wyznaczając średnią ich wartość. Z kolei na rys. 8. widzimy ekran startowy systemu BMS umożliwiającą użytkownikowi stwierdzenie czy baterie mieszczą się w poprawnych parametrach pracy oraz jest wyświetlany szacowany zasięg pracy wózka wyrażony w czasie – godzinach, obliczany na podstawie średniego zużycia energii.

**Autorzy:** dr inż. Tomasz Makowski, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Katedra Inżynierii Elektrycznej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: [tomasz.makowski@pk.edu.pl](mailto:tomasz.makowski@pk.edu.pl); inż. Maciej Gibas, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: [maciej.gibas@pk.edu.pl](mailto:maciej.gibas@pk.edu.pl); inż. Kacper Chojkowski, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: [kacper.chojkowski@pk.edu.pl](mailto:kacper.chojkowski@pk.edu.pl).

#### LITERATURA

- [1] Potrzeba matką wynalazku – historia wózków inwalidzkich. <https://www.mobilex.pl/blog/potrzeba-matka-wynalazku-historia-wozkow-inwalidzkich/> Dostęp: 12.06.2022
- [2] Józwicka A., Historia wózków inwalidzkich i polska nadzieja dla niepełnosprawnych. 19.08.2021, <https://narencie.pl/historia-wozkow-inwalidzkich-i-polska-nadzieja-dla-niepelnosprawnych/> Dostęp: 12.06.2022
- [3] Historia wózka inwalidzkiego - od początków do Blumil. <https://blumil.pl/blog/2016/11/30/historia-wozka-inwalidzkiego-od-poczatkow-do-blumil/> Dostęp: 12.06.2022
- [4] Woods B., Watson N., The social and technological history of wheelchairs, *IJTR*, 11 (2013), No. 9
- [5] Woods B., Watson N., A Short History of Powered Wheelchairs, *Assistive Technology*, 15 (2003), No. 2, 164-180
- [6] Action Trackchair ST, <https://actiontrackchair.com/models/action-trackchair-st/> Dostęp: 12.06.2022
- [7] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy
- [8] Wdowicz A., Zagospodarowanie powierzchni sklepu, *Merchandising*, Wyższa Szkoła Promocji, Warszawa 2014, 5-19
- [9] Fręchowicz A., Wariantowe rozwiązania sterowania układem napędowym wózka inwalidzkiego wyposażonym w klasyczne silniki prądu stałego, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2008) nr 4, 54-59
- [10] Popławski M., Słowik A., Implementacja interfejsu użytkownika przeznaczonego do sterowania elektrycznym wózkiem inwalidzkim, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2016) nr 8, 66-69
- [11] Wach P., Brushless DC Motor Drives (BLDC). In: *Dynamics and Control of Electrical Drives*. Springer, Berlin 2011.
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, rok 2002
- [13] Motor BM1412ZXF, <https://www.yalumotor.com/geared-brushless-dc-motor/bigger-power-three-wheel-cart-dc-motor-bm1412zxf-engine-prototype> Dostęp: 08.06.2022
- [14] LSM6DS33 3D Accelerometer and Gyro Carrier with Voltage Regulator, <https://www.pololu.com/product/2736> Dostęp: 08.06.2022