

Elektryczna platforma gąsienicowa

Jacek Rduch, Paweł Jureczko

Streszczenie

W pracy tej przedstawiono proces projektowania i budowy zdalnie sterowanej gąsienicowej platformy napędzanej silnikami elektrycznymi. Urządzenie to może służyć jako podstawa do tworzenia mobilnych robotów wyposażonych w manipulatory czy wózków AGV.

Na wstępie przedstawiono dostępne rozwiązania oraz ich zróżnicowanie ze względu na zastosowanie i rodzaj napędu. Następnie scharakteryzowano wybraną koncepcję pojazdu oraz spisano założenia projektowe zawierające zarówno cechy konstrukcyjne jak i użytkowe.

W dalszej części artykułu uwagę poświęcono napędowi. W pierwszej kolejności wyznaczono wymaganą moc napędu w oparciu o docelową prędkość pojazdu z uwzględnieniem kół napędowych oraz wymagany moment obrotowy. W tym celu przyjęto odpowiednie współczynniki dla dobranych gąsienic gumowych, a następnie obliczono opory, jakie należy pokonać podczas ruchu pojazdu w najbardziej niekorzystnych zakładanych warunkach. Uwzględniono między innymi pokonywanie wzniesień o nachyleniu odpowiadającemu dopuszczalnym podjazdom. Obliczona moc przełożała się na zastosowanie akumulatora litowo-jonowego o napięciu nominalnym 60 V. Przeanalizowano następnie dostępne typy motoreduktorów, wskazano ich główne wady oraz zalety. Na tej podstawie wybrano optymalne rozwiązanie składające się z silnika bezszczotkowego prądu stałego oraz przekładni ślimakowej. Znając nominalną prędkość obrotową silnika obliczono wymagane przełożenie. Dobrano następnie konkretne podzespoły dostępne na rynku.

Opracowano następnie układ sterowania oparty o moduł Arduino UNO wykorzystujący płytkę NodeMCU do komunikacji poprzez sieć Wi-Fi z serwerem. Wysyłanie poleceń zrealizowano za pomocą aplikacji na system Android, przy czym dostęp do serwera możliwy jest również przez stronę internetową. Odebrane komendy są przetwarzane przez Arduino na odpowiednie sygnały o kierunku obrotów oraz na sygnał PWM odpowiadający zadanej prędkości obrotowej. Do konwersji PWM na wartość analogową zaprojektowano filtr z wykorzystaniem programu LTSpice.

W kolejnym kroku przedstawiono proces projektowania konstrukcji pojazdu. Wykorzystano do tego celu oprogramowanie SolidWorks, a rendery wykonano w narzędziu Visualize. Na podstawie modelu 3D opracowano dokumentację wykonawczą i złożeniową. Opisano również poszczególne główne podzespoły zaprojektowanego pojazdu gąsienicowego. Ramę urządzenia oparto na profilach aluminiowych oraz blachach stalowych unikając skomplikowanej obróbki.

Ostatnim etapem była budowa prototypu i przeprowadzenie testów. Wyniki poddano następnie analizie, a na tej podstawie wyciągnięto wnioski i podsumowano projekt.

Słowa kluczowe: gąsienice; silnik elektryczny; Arduino; robot mobilny.

Abstract

This paper presents the process of designing and building a remotely controlled crawler platform powered by electric motors. This device can serve as a basis for creating mobile robots equipped with manipulators or AGVs.

At the beginning, available solutions and their differentiation due to the application and type of drive are presented. Then, the selected vehicle concept is characterized and the design assumptions containing both construction and utility features are written down.

In the further part of the article, attention is paid to the drive. First, the required drive power was determined based on the target vehicle speed, taking into account the drive wheels and the required torque. For this purpose, appropriate coefficients were adopted for the selected rubber tracks and then the resistances that must be overcome during the movement of the vehicle in the most unfavorable assumed conditions were calculated. Among other things, overcoming slopes with an inclination corresponding to permissible driveways were taken into account. The calculated power translated into the use of a lithium-ion battery with a nominal voltage of 60 V. Then, the available types of gear motors were analyzed, their main advantages and disadvantages were indicated. On this basis, the optimal solution consisting of a brushless DC motor and a worm gear was selected. Knowing the nominal rotational speed of the motor, the required ratio was calculated. Specific components available on the market were then selected.

A control system was then developed based on the Arduino UNO module using the NodeMCU board to communicate with the server via WiFi. Commands were sent using an Android application, while access to the server is also possible via the website. The received commands are processed by Arduino into appropriate signals about the direction of rotation and into a PWM signal corresponding to the set rotational speed. A filter was designed using the LTSpice program to convert PWM to an analog value.

The next step was to present the process of designing the vehicle structure. SolidWorks software was used for this purpose, and the renders were made in the Visualize tool. Based

on the 3D Model, executive and assembly documentation was developed. The individual main components of the designed tracked vehicle were also described. The frame of the device was based on aluminum profiles and steel sheets, avoiding complicated machining.

The final stage was to build a prototype and conduct tests. The results were then analyzed and conclusions were drawn and the project was summarized.

Keywords: caterpillar tracks; electric motor; Arduino; mobile robot.

1. Wstęp

Rozwój automatyzacji i robotyzacji procesów zarówno w przemyśle jak i życiu codziennym stwarza szerokie pole do zastosowań zaawansowanych technologii. Duże znaczenie ma ograniczanie udziału człowieka i zwiększanie uniwersalności rozwiązań. Odpowiedzią na te wymogi są roboty mobilne zdolne do wykonywania złożonych prac, dając jednocześnie możliwość łatwego dostosowania do wymagań. Jednym z oferowanych rozwiązań są urządzenia zintegrowane z zespołem napędowym, co wymusza dostosowanie całej konstrukcji do danego zastosowania. W niektórych przypadkach jest to natomiast uzasadnione, ponieważ takie pojazdy można zoptymalizować z uwagi na masę czy gabaryty. Jest to szczególnie istotne na przykład przy projektowaniu łazików kosmicznych.

Innym rozwiązaniem są platformy będące jednocześnie urządzeniem wykonawczym. Są one stosowane na coraz szerszą skalę w logistyce. Umożliwiają transport ładunków również w sposób autonomiczny, sprowadzając w ten sposób rolę człowieka do wdrożenia oraz serwisu systemu.

Odrębne podejście stanowią platformy przystosowane do montażu na nich urządzeń wykonawczych. Daje to największą swobodę użytkowania oraz uniwersalność. Posiadanie jednej platformy z wieloma wariantami zabudowy jest powszechnie stosowaną taktyką między innymi w przemyśle wojskowym. Pozwala to na redukcję kosztów związanych z serwisowaniem a także zapewnia ich kompatybilność.

W przemyśle można również dostrzec rozwój takich konstrukcji. Przykładem jest system KUKA KMR QUANTEC (rys. 1), w którego skład wchodzi platforma omniMove, na której zamontowany jest robot przemysłowy. Rozwiązanie to może zostać zastosowane między innymi przy pracy z dużymi gabarytami lub obsługą kilku stanowisk, gdzie niemożliwe jest zastosowanie toru jezdznego, nad którym przewaga polega również na uniwersalności – nie ma jednego toru ruchu, ale może być dowolnie zaprogramowana ścieżka.

Poszczególne pojazdy różnią się wieloma aspektami, między innymi układem napędowym, układem bieżnym oraz zasilaniem. Wybór właściwej kombinacji wyżej wymienionych podzespołów jest kluczowy dla optymalnej pracy. Inne wymagania stawiane są pojazdom pracującym w halach produkcyjnych, inne pracującym na Księżycu, a jeszcze inne pojazdom wojskowym.



↑ Rys. 1. Robot mobilny KUKA KMR QUANTEC [1]

2. Koncepcja

Wybór koncepcji poprzedzono sformułowaniem założeń i najważniejszych cech, które należy osiągnąć. Pojazd ma pracować zarówno wewnątrz pomieszczeń, jak i na zewnątrz, w związku z czym musi przede wszystkim mieć możliwość pokonywania zróżnicowanego terenu oraz nie może uszkadzać utwardzonych nawierzchni, takich jak posadzki w halach przemysłowych. Aby mógł przejeżdżać pomiędzy pomieszczeniami należy uwzględnić szerokość drzwi jako maksymalną szerokość platformy. Moc pojazdu musi być na tyle duża, aby możliwy był wjazd na podjazdy o maksymalnym dopuszczalnym nachyleniu przewidzianym przez normy. Należy również uwzględnić obecność ludzi wokół pojazdu, którego praca nie może być dla nich zbyt uciążliwa. Dodatkowo projektowane urządzenie ma być bezprzewodowe, zarówno pod kątem zasilania jak i sterowania. Czas pracy na jednym ładowaniu określono jako 1 godzina. Sama konstrukcja powinna składać się z możliwie najprostszych i ogólnodostępnych elementów redukując czas i koszt produkcji a także musi dawać możliwość łatwej rozbudowy oraz udźwig minimum 100 kg.

Po przeanalizowaniu założeń oraz dostępnych rozwiązań postawiono na budowę platformy posiadającej gumowe gąsienice, do napędu których zastosowane zostaną dwa elektryczne motoreduktory umieszczone z tyłu pojazdu. Do zasilania zdecydowano się zastosować akumulator składający się z ogniw litowo-polimerowych serii 18650 w odpowiednim układzie dającym potrzebne napięcie oraz pojemność. Sterowanie postanowiono oprzeć na module Arduino UNO wykorzystującym układ NodeMCU do komunikacji poprzez sieć Wi-Fi. Maksymalną szerokość pojazdu z uwagi na przejazd przez drzwi określono na 800 mm.

3. Napęd

3.1. Określenie parametrów

Przed przystąpieniem do wyznaczenia parametrów napędu konieczne było przybliżone określenie masy pojazdu oraz założenie średnicy koła napędowego gąsienicy. Do tego celu przygotowano wstępny szkic ramy, którą postanowiono wykonać z profili aluminiowych, a następnie obliczono jej masę. Dobrano również gąsienice gumowe w rozmiarze $180 \times 72 \times 36$. Oznacza to gąsienicę o szerokości 180 mm, składającą się z 36 ogniw o długości 72 mm. Z katalogu producenta zostało dobrane odpowiednie koło napędowe posiadające 12 zębów i średnicę zewnętrzną 293,5 mm. Do każdej gąsienicy zaplanowano użycie dwóch kół jezdnych, poprawiających rozłożenie masy oraz koła napinającego z przodu pojazdu. Zsumowano następnie masę ramy i zespołów gąsienic otrzymując 135 kg. Przyjęto, że pozostałe komponenty takie jak motoreduktory, elementy montażowe i elektronika będą ważyć około 100 kg. Uwzględniając założony na wstępie udźwig i zaokrąglając w górę otrzymano przybliżoną masę pojazdu z ładunkiem 350 kg i wartość tę przyjęto do obliczeń napędu. Minimalny kąt jaki platforma musi móc pokonać określono jako 10° odpowiadający pochylni dla ruchu pieszo i wózka inwalidzkiego [2]. Założono, że pojazd ma osiągać prędkość maksymalną 5 km/h z przyspieszeniem 1 m/s^2 .

W pierwszym kroku należało dobrać z tabeli odpowiedni współczynnik tarcia. Dokonano tego przy założeniu poruszania się po drogach bitych w złym stanie. Odczytano wartość wynoszącą $f = 0,05$ [3].

Drugim współczynnikiem niezbędnym do obliczeń jest sprawność układu napędowego. Można założyć, że będzie ona stosunkowo niska z uwagi na zastosowany rodzaj gąsienic, niedokładności montażu czy sprawność motoreduktora. Przyjęto więc sprawność 50%.

Wzór 1, do którego podstawiono parametry pozwala na wyznaczenie mocy jednostkowej P_j pojazdu gąsienicowego [3].

$$P_j = \frac{f + \frac{\alpha}{100}}{270 \cdot n_m \cdot (0,95 - 0,005 \cdot V)} \cdot 1000 \cdot V \cdot \frac{1}{36} = 6,66 \text{ kW/t} \quad (1)$$

gdzie:

- f – współczynnik tarcia;
- α – kąt nachylenia $[\circ]$;
- n_m – sprawność;
- V – Prędkość maksymalna pojazdu $[\text{m/s}]$.

Otrzymany wynik przeliczono następnie z uwzględnieniem założonej masy pojazdu a także współczynnika przeciążenia $\Delta = 1,6$ oszacowanego na podstawie wytycznych [3]. Obliczoną w ten sposób moc podzielono przez liczbę zastosowanych silników uzyskując wymaganą moc pojedynczego napędu (2) [3].

$$P = \frac{P_j \cdot m}{2000} \cdot \Delta \cdot \frac{1}{2} = 1,87 \text{ kW} \quad (2)$$

gdzie:

P_j – moc jednostkowa $[\text{kW/t}]$;

m – masa pojazdu $[\text{t}]$;

Δ – współczynnik przeciążenia.

Wyznaczono również prędkość obrotową wału wyjściowego motoreduktora (3) w oparciu o dobrane koło napędowe i założoną prędkość ruchu.

$$n = \frac{V \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r} = 90,5 \text{ obr/min} \quad (3)$$

gdzie:

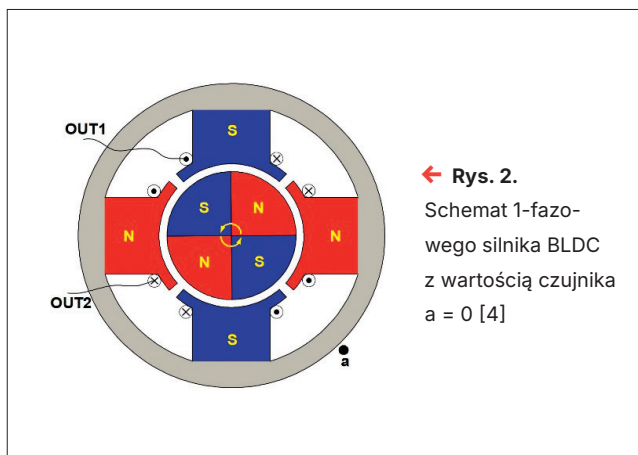
r – promień zewnętrzny zębatego koła napędowego $[\text{m}]$.

3.2. Dobór podzespołów

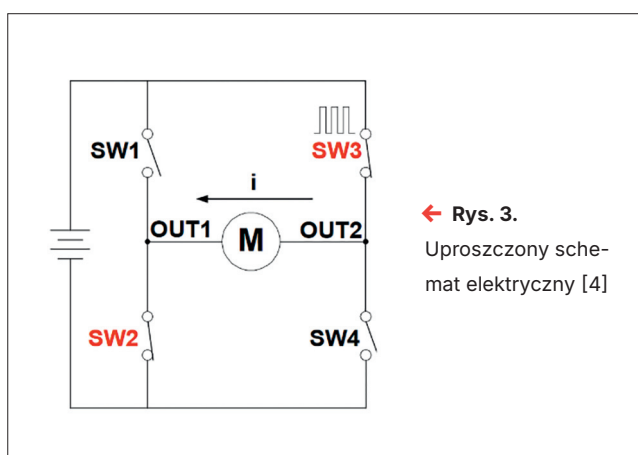
W pierwszej kolejności dokonano doboru silnika elektrycznego. Z uwagi na założenie pracy bezprzewodowej z zasilaniem akumulatorowym postanowiono zastosować silniki prądu stałego. Pozwoli to uprościć układ redukując straty mocy oraz koszt. Urządzenia te wykorzystują pole magnetyczne powstałe w wyniku przepływającego prądu do generowania momentu obrotowego.

Wśród dostępnych rozwiązań można wyróżnić między innymi silniki:

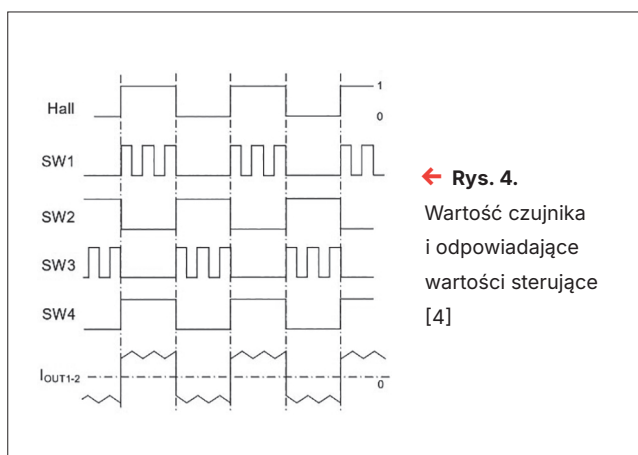
- Komutatorowe, w których zasilanie kolejnych klatek następuje przez styk szczotek z ich obwodami w komutatorze. Rozwiązanie to jest stosunkowo tanie, jednak mechaniczne sterowanie wymaga okresowego serwisowania. Tarcie szczotek zmniejsza użyteczny moment obrotowy silnika oraz generuje straty w obwodzie elektrycznym. W konstrukcjach tych uzwojenie znajduje się na wirniku i jest to główne miejsce generowania ciepła podczas pracy. W wyniku styku szczotek i komutatora istnieje również ryzyko pojawiania się łuków elektrycznych, czego efektem jest głośniejsza praca oraz generowanie zakłóceń elektromagnetycznych (EMI) [4].
 - Bezsztotkowe (BLDC), w których za sekwencję zasilania kolejnych obwodów w silniku odpowiada układ elektroniczny, wykorzystujący czujniki wykrywające pozycję wału. Jest to rozwiązanie znacznie bardziej niezawodne w stosunku do szczotek i prawie nie wymaga serwisowania. Nie ma również miejsca na powstawanie łuków, dzięki czemu silniki te cechują się cichszą pracą oraz mniejszym poziomem zakłóceń. W wirniku znajdują się magnesy trwałe, natomiast uzwojenia umieszczone są na korpusie, co poprawia odprowadzanie ciepła. Mniejsza masa wirnika oznacza również mniejszy moment bezwładności, co przekłada się na wzrost dynamiki urządzenia. Silniki BLDC cechują się również wyższą mocą użyteczną w stosunku do wykonania ze szczotkami. Cena tych silników jest nieco wyższa niż komutatorowych i dodatkowo do działania niezbędny jest odpowiedni sterownik. Jest to układ, który na podstawie informacji z czujników najczęściej wykorzystujących efekt Halla zasilają w odpowiedni sposób cewki silnika (rys. 2–4), który może być zarówno jedno- jak i trójfazowy. [4].
- Po przeanalizowaniu cech obu rozwiązań postanowiono wykorzystać silnik bezszczotkowy do napędu pojazdu.



← Rys. 2.
Schemat 1-fazowego silnika BLDC z wartością czujnika $a = 0$ [4]



← Rys. 3.
Uproszczony schemat elektryczny [4]



← Rys. 4.
Wartość czujnika i odpowiadające wartości sterujące [4]

Założono również konieczność minimalnego zapasu mocy w stosunku do obliczonej wynoszącego 10%.

Wysoka moc silników zadecydowała o zastosowaniu wyższego niż typowo stosowane w automatyce napięcia zasilania celem zmniejszenia natężenia prądu. Za właściwe uznano napięcie 60 V, co oznacza akumulator zbudowany z 16 ogniw połączonych szeregowo o napięciu znamionowym 3,7 V każde.

Na podstawie wymaganej mocy, napięcia zasilania oraz dostępności dobrano silnik elektryczny o mocy 2,2 kW generujący moment 7,2 Nm przy prędkości obrotowej

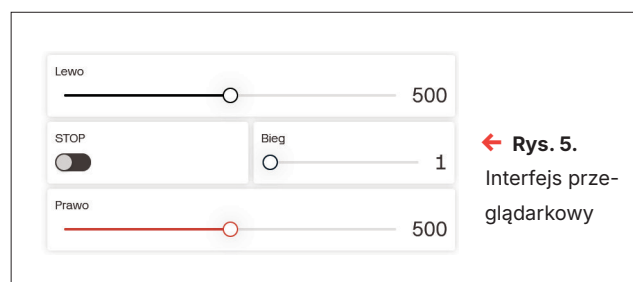
2850 obr./min wraz z dedykowanym przez producenta sterownikiem.

Następnie przystąpiono do doboru przekładni. Aby uzyskać wymaganą prędkość pojazdu oraz odpowiednio wysoki moment obrotowy konieczne było zastosowanie przełożenia $i = 30$. Podjęto decyzję o wykorzystaniu przekładni ślimakowej. Za tym wyborem przemówiła między innymi dostępność wielu rozmiarów, w tym z kołnierzem pasującym do dobranego silnika oraz korzystna cena. Dodatkową korzyścią z stosowania reduktora ślimakowego jest jego samohamowność. Możliwe było dzięki temu zrezygnowanie ze stosowania dodatkowego hamulca, co zmniejszyło koszt, złożoność oraz gabaryty układu. Niewielkie rozmiary oraz wał wyjściowy ułożony pod kątem 90° w stosunku do napędowego daje możliwość odpowiedniego zabudowania takiego motoreduktora w pojeździe. Z katalogu producenta dobrano przekładnię RVM90 o przełożeniu $i = 30$ i sprawności 80% [5].

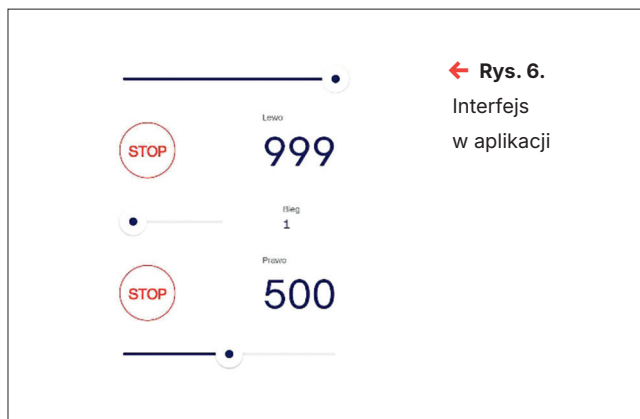
4. Sterowanie

Do sterowania pojazdem wykorzystano płytke prototypową UNO R3 taktowaną z częstotliwością 16 MHz. Wymaga ona zasilania z zakresu 5–12 V. Zastosowano więc przetwornicę *step-down*, konwertującą napięcie 60 V z akumulatora na 12 V do zasilania modułu UNO. Logika płytki pracuje na napięciu 5 V, a obciążalność pojedynczego wyjścia to 40 mA. W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniem sygnały do sterowników silników postanowiono wysłać przez moduł przekaźników. Wybrana płytka nie posiada wyjść analogowych potrzebnych do zadawania prędkości. Zastosowano więc filtr dolnoprzepustowy RC o parametrach $R = 1 \text{ k}\Omega$ i $C = 100 \mu\text{F}$ zamieniający sygnał PWM o danym nasyceniu na proporcjonalny sygnał analogowy.

Do komunikacji wybrano moduł NodeMCU. Z uwagi na niewielki pobór prądu zasilono go z płytki UNO. Zaprogramowano w nim między innymi parametry niezbędne do połączenia z wybraną siecią Wi-Fi. Do przesyłania komend wykorzystano darmową platformę IoT BLYNK. Daje ona możliwość stworzenia interfejsu na stronie internetowej (rys. 5) oraz udostępnia serwer, z którego moduł NodeMCU pobiera dane. Dostępna jest również aplikacja na system Android dająca podobne możliwości co interfejs przeglądarkowy i korzystająca z tego samego serwera. Przygotowano panel (rys. 6), pozwalający na sterowanie poszczególnymi gąsienicami, wybór prędkości oraz zatrzymanie pojazdu. Dzięki temu sterować pojazdem można zarówno z poziomu smartfona jak i przeglądarki internetowej na komputerze.



← Rys. 5.
Interfejs przeglądarkowy



← Rys. 6.
Interfejs
w aplikacji

Wartość prędkości obrotowej silnika zadawana jest jako wartość z przedziału 0–999, przy czym powyżej 500 oznacza ruch do przodu, a poniżej 500 do tyłu. Polecenia odebrane z serwera przez moduł komunikacyjny łączone są w jedną komendę mieszczącą się w jednej zmiennej typu INT i przekazywane za pomocą portu szeregowego do modułu głównego UNO.

5. Konstrukcja

Do opracowania modelu 3D oraz dokumentacji wykonawczej wykorzystano program SolidWORKS. Projekt konstrukcji rozpoczął od umieszczenia na modelu dobranych wcześniej komponentów napędu. Pozwoliło to na określenie gabarytów pojazdu i opracowanie ramy. Postanowiono ją wykonać z profili aluminiowych systemu ask. Dało to możliwość wykorzystania szerokiej gamy gotowych komponentów i akcesoriów takich jak elementy montażowe. Dodatkowo obecność rowków w profilach, w które możliwe jest włożenie wpustu z gwintem już po zmontowaniu ramy umożliwia bardzo łatwą rozbudowę i montaż dodatkowego wyposażenia. Z uwagi na obciążenia dynamiczne wykorzystano profile serii ciężkiej cechujące się podwyższoną sztywnością i wytrzymałością. Poszczególne profile ramy połączono oferowanymi przez producenta łącznikami standardowymi wymagającymi konkretnej pozycji oraz automatycznymi, które umożliwiają w każdej chwili przesunięcie profilu tam gdzie jest to wymagane.

Zamodelowano następnie podzespoły napędowe składające się z motoreduktora przekazującego moment obrotowy na spawany wał połączony z zębatym kołem łańcuchowym. Wał osadzono w dwóch zespołach łożyskowych przymocowanych do blach, które następnie są montowane do ramy z użyciem wpustów ciężkich dających zwiększony moment dokręcania oraz mniejszy luz w rowku.

Z przodu pojazdu umieszczono zespoły napinające składające się ze spawanego wału z gładką tarczą prowadzącą łańcuch oraz zespołów łożyskowych i blachy montażowej.

Po bokach zainstalowano zespoły kół jezdnych odpowiadające za poprawę prowadzenia łańcucha oraz zwiększenie liczby punktów podparcia pojazdu rozkładając jego masę. Na każdą łańcuchownicę przewidziano po dwa takie koła.



↓ Rys. 7.
Zamodelowany pojazd

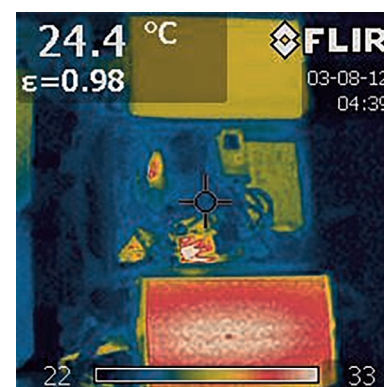
Wewnątrz ramy umieszczono zespół elektroniki składający się z uproszczonych modeli komponentów układu oraz skrzynki, którą postanowiono wykonać na drukarce 3D z materiału PLA. Poniżej przygotowano miejsce na akumulator możliwy do wyjęcia od przodu, a po bokach dodatkowe wentylatory.

Wszystkie elementy stalowe wykonano ze stali S235. Komponenty w postaci blach zostały wycięte laserem, natomiast wał należało obrobić po spawaniu. Zaplanowano również poddanie wszystkich części oksydacji w celu ochrony antykorozyjnej.

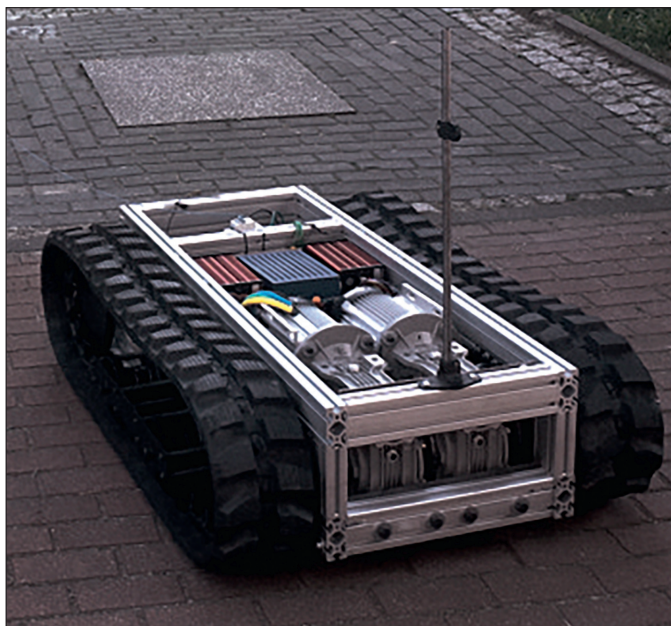
Gotowy projekt (rys. 7) pozwolił na stosunkowo dokładne określenie masy, która wyniosła 235 kg, czyli mniej niż masa założona do obliczeń napędu. Zweryfikowano również gabaryty pod kątem zgodności z założeniami i stwierdzono ich poprawność.

6. Prototyp

Na podstawie sporządzonej dokumentacji zamówiono i wykonano wszystkie komponenty, a następnie przystąpiono do montażu, który rozpoczął od ramy. Przygotowano następnie wszystkie podzespoły i zainstalowano je na ramie. Ostatnim krokiem montażu mechanicznego było założenie łańcuchownic i następnie ich napięcie. W kolejnym etapie przystąpiono do montażu układu elektroniki. Gotową skrzynkę zamontowano na profilach i połączono z silnikami. Przeprowadzono następnie testy pojazdu. Dla bezpieczeństwa rozpoczęto od uruchomienia z łańcuchownicami znajdującymi się w powietrzu. Pozwoliło to na nagrzanie się komponentów przez kilkuminutową pracę na pełnej prędkości. Za pomocą kamery IR zidentyfikowano obszary o podwyższonej temperaturze i skierowano na nie wentylatory. Najwyższe temperatury



↑ Rys. 8. Pomiar kamerą IR



← Rys. 9.
Pojazd podczas testów

osiągał wał czynny reduktora oraz sterowniki silników bezszczotkowych (rys. 8). Przystąpiono następnie do testów terenowych pojazdu. Sprawdzono jego możliwości pokonywania wzniesień, w tym schodów, poruszanie się w pomieszczeniach oraz na zewnątrz.

7. Podsumowanie

W ramach projektu zbudowano zdalnie sterowaną bezprzewodową platformę gąsienicową z napędem elektrycznym zgodną z postawionymi na początkowym etapie założeniami. Zastosowane precyzyjnie wykonane elementy konstrukcyjne i uniwersalne łączniki pozwoliły na sprawny montaż, a także pozwalają na łatwą rozbudowę platformy. Testy wykazały bardzo dobre własności bezszczotkowych silników prądu stałego. Cechują się one dużą sprawnością zmniejszając zużycie energii przy dużej oferowanej mocy, dodatkowo są ciche i dobrze odprowadzają ciepło przez korpus. Zauważoną wadą w stosunku do konstrukcji szczotkowych jest konieczność zastosowania dodatkowego sterownika, który zajmuje dodatkowe miejsce, a także się nagrzewa. Można jednak stwierdzić, że posiadają więcej zalet niż wad i są dobrym wyborem do wielu zastosowań związanych z automatyką i robotyką.

Literatura

- [1] Broszura informacyjna KUKA Mobile robotics_KMR QUANTE.
- [2] Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [3] BURDZIŃSKI Z.: *Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego*. WKŁ, Warszawa 1972.
- [4] ZHAO J., YU Y.: *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. „AN047” 5/7/2014.
- [5] <http://www.dualsystem.com.pl/katalogi/RV-przekladnie-slimakowe-web.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 18.08.2024].

👤 **Mgr Inż. Jacek Rduch** – pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą zagadnień konstrukcji oraz automatyki urządzeń przemysłowych.

👤 **Dr inż. Paweł Jureczko** – pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej Politechniki Śląskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą zagadnień mechaniki, budowy maszyn, mechatroniki i bioinżynierii.