

Optymalizacja systemu sterowania napędami elektrycznymi oraz układu zawieszenia robota kołowo-kroczącego z wykorzystaniem algorytmu Grey Wolf Optimizer

Streszczenie. Artykuł przedstawia system sterowania napędami elektrycznymi wbudowanymi w robota kołowo-kroczącego o 14 stopniach swobody. Przedstawiona została problematyka sterowania oraz dobór napędów do realizacji określonych funkcji, które wynikają z charakterystyki sterowania robotem. Ponadto opisano nowatorskie podejście do syntezy geometrycznej układu mechanicznego zawieszenia (celem jest odtwarzanie zadanej trajektorii przy użyciu tylko jednego napędu). Przytoczona została również problematyka projektowania regulatora prędkości układu. Optymalizacja wymienionych elementów została wykonana za pomocą algorytmu Grey Wolf Optimizer (GWO).

Abstract. The paper presents the control system of the electrical drives implemented in the wheel-legged robot with 14 degrees of freedom. The issues related to the control and the selection of hardware is considered. Moreover, the geometric synthesis of the mechanical system was presented (for reference trajectory tracking using one drive only). The second task was focused on the speed controller optimization. For mentioned purposes, the Grey Wolf Optimizer (GWO) was applied. (Optimisation of the control system of the electrical drives and suspension applied in wheel-legged robot using the Grey Wolf Optimizer algorithm)

Słowa kluczowe: sterowanie polowo-zorientowane, algorytm GWO, optymalizacja, BLDC, robot kołowo-kroczący
Keywords: field oriented control, Grey Wolf Optimizer, optimization, the BLDC motors, wheel-legged robot

Wstęp

Analizując aktualne trendy aplikacji robotów w przemyśle, można zaobserwować intensywny wzrost popularności autonomicznych zrobotyzowanych platform [1], [2]. Połączone w sieć komunikujących się ze sobą robotów mogą tworzyć inteligentne magazyny, które w określonych warunkach pozwalają na minimalizację wymaganej przestrzeni transportowej [3]. Ponadto wykorzystanie robotów w transporcie pozwala zmniejszyć ryzyko wypadków oraz urazów, które wynikają z przemieszczania towarów na wózkach prowadzonych przez człowieka. Ze względu na ograniczoną przestrzeń przeznaczoną na korytarze transportowe, zwiększone jest natomiast prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji, w której przeszkoda (np. zagubiona paczka) blokuje przejazd. W takim przypadku unieruchomione jest funkcjonowanie całego systemu do czasu usunięcia awarii przez obsługę.

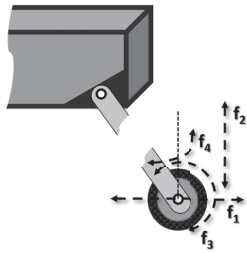
Innym zauważalnym trendem jest rozwój usług transportowych z wykorzystaniem niskoemisyjnych pojazdów autonomicznych. Wykorzystanie niewielkich platform pozwala ograniczyć koszty, skrócić czas oczekiwania na dostawę oraz rozszerzyć strefy dostaw o obszary, w których nie mogą poruszać się klasyczne furgonetki. Analiza sytuacji, które można było zaobserwować podczas pandemii Covid-19, pozwala stwierdzić, że zastosowanie autonomicznych pojazdów umożliwi zachowanie ciągłości działania z ograniczoną liczbą personelu [4]. Podczas projektowania zrobotyzowanych platform kurierskich należy wziąć pod uwagę istniejącą infrastrukturę miejską, wysokie krawężniki, schody, strome podjazdy oraz wszelkie inne przeszkody, które mogą ograniczać przejazd platform kołowych. Znane są rozwiązania, które wykorzystują napędy gąsienicowe. Wspomniana konstrukcja prowadzi do lepszego działania w trudnych warunkach terenowych, jednak znacznie wzrastają koszty produkcji [5]. W wielu przypadkach, charakterystyczna budowa robotów, nie pozwala lub utrudnia pokonywanie przeszkód.

Rozwiązaniem opisanych powyżej problemów jest zastosowanie platform, których ruch inspirowany jest metodą poruszania się istot żywych. Roboty kroczące, w zależności od zastosowanej struktury, mogą dodatkowo umożliwiać poziomowanie platform, dzięki czemu możliwe jest transpor-

towanie delikatnych towarów, sypkich substancji lub cieczy również na stromych podjazdach. Pomimo bardzo dobrych właściwości terenowych, w tym możliwości poruszania się po schodach, charakteryzują się one ograniczoną prędkością podczas przemieszczania się po płaskich, utwardzonych powierzchniach (np. drogach, chodnikach). Właściwość wynika z potrzeby balansowania platformą i zapewnienia jej stabilności [6]-[8]. Należy również podkreślić, iż konstrukcje odzwierciedlające ruch zwierząt rozwijane są przez czołowe światowe ośrodki badawcze. Wśród nich należy wymienić rozwiązania kroczące [9] rozwijane przez ETH Zurich, a także kołowe z zaawansowaną strukturą balansowania [10], [11] - odzwierciedlające ruch na dwóch nogach, wdrażane między innymi przez Boston Dynamics czy Tencent.

W artykule przedstawiono hybrydowe rozwiązanie, które uwzględnia wszystkie zalety robotów kroczących, jednocześnie ograniczając niekorzystne cechy takich konstrukcji. Zaproponowana struktura robota kołowo-kroczącego przewidyje szybkie przemieszczanie się - jazdę, gdy pozwala na to środowisko, a także kroczenie, gdy wymagane jest omijanie przeszkody. W związku z tym, niezbędne jest zastosowanie napędów odpowiedzialnych za jazdę, poziomowanie, przekraczanie oraz skręcanie kół platformy. Realizowana jest kontrola łącznie czterema stopniami swobody pojedynczej kończyny (Rys. 1). Należy zaprojektować system sterowania, który będzie umożliwiał synchronizację wszystkich 14 napędów robota (ze względu na uproszczenie polegające na zapewnieniu skreću jedynie kół zamocowanych na przednich kończynach).

W robotyce najczęściej spotykane są napędy elektryczne, gdyż pozwalają one na zapewnienie najlepszej mobilności, a także charakteryzują się największą precyzją pozycjonowania i łatwością sterowania w porównaniu z układami hydraulicznymi, pneumatycznymi czy silnikami spalinywymi, w których paliwo oraz inne niezbędne do funkcjonowania ciecze stanowią dodatkowe obciążenie [12]. Należy zauważyć, że zadania stawiane napędom robotów również są różnorodne - należy wyróżnić rozwiązania, w których niezbędna jest wysoka prędkość obrotu (np. napędy laserowych systemów LiDAR), utrzymanie wysokiego momentu przy ni-



Rys. 1. Stopnie swobody pojedynczej kończyny robota kołowo-kroczącego

skich prędkościach lub zatrzymaniu, a także wysoka precyzja pozycjonowania. W zależności od wykonywanej czynności, napędy są różnicowane poprzez zastosowane typy silników (np. BLDC, silników DC z magnesami trwałymi sprzężonymi z przekładniami, a także silników krokowych) [13]-[14]. Niewątpliwą zaletą zastosowania napędów elektrycznych w robotach mobilnych jest również możliwość zastosowania pojedynczego źródła energii elektrycznej, a także szansa na wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (np. w postaci paneli fotowoltaicznych) [15].

Należy również zwrócić uwagę na rosnącą popularność elementów sztucznej inteligencji oraz nowoczesnych metod optymalizacji w zagadnieniach związanych z robotami. Obserwowany trend wynika ze specyfiki konstrukcji oraz obszaru działania robotów. Warunki pracy zastosowanych napędów elektrycznych mogą ulegać zmianom pod wpływem długotrwałego działania, przełączania obciążenia, itd. Ponadto, istotne zakłócenia mogą być powodowane warunkami otoczenia (np. twardość powierzchni ruchu). Skomplikowana budowa części mechanicznej może również wprowadzać utrudnienia projektowe. Należy również zauważyć, że w trakcie eksploatacji mogą pojawiać się oscylacje zmiennych stanu [16]. W związku z powyższym, w projektowaniu oraz sterowaniu robotów stosowane są metaheurystyczne algorytmy optymalizacyjne, modele rozmyte oraz struktury neuronowe [17]-[20].

W niniejszej publikacji opisano zastosowanie algorytmu GWO w syntezie robota [21]-[23]. Zadaniem była optymalizacja części mechanicznej oraz dostrajanie regulatora prędkości. Wybrane narzędzie pozwala na pominięcie złożonych obliczeń oraz wprowadzenie wymaganych ograniczeń uzyskiwanych rozwiązań. Algorytmy bazujące na obserwacji zachowań grup organizmów umożliwiają uzyskiwanie wyników bez konieczności obliczeń cząstkowych pochodnych funkcji celu. Jednocześnie możliwa jest łatwa do wprowadzenia optymalizacja wielokryterialna.

Układ artykułu uwzględnia sześć głównych sekcji tematycznych. Po wprowadzeniu przedstawiono algorytm GWO oraz aplikację wspomnianej metody w optymalizacji konstrukcji oraz układu sterowania robotem. Następnie opisano zastosowany napęd elektryczny z silnikami BLDC, a także załączono wyniki badań symulacyjnych. Kolejną część dotyczy zagadnień konstrukcyjnych systemu. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych. Publikacja została zakończona krótkim podsumowaniem.

Część mechaniczna robota

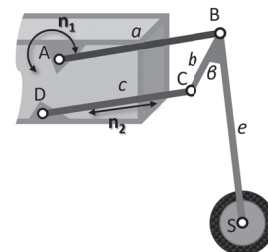
Zawieszenie kół, zaraz po układzie napędowym, jest najważniejszym układem w każdym pojeździe. Zapewnia prawidłowy kontakt z podłożem, komfort i bezpieczeństwo przewożonych osób oraz towarów. Znane są również rozwiązania, które pozwalają na zmianę charakterystyki tłumienia, regulację prześwitu oraz poziomowanie pojazdu niezależnie od

podłoża. Rozwiązania pasywne opierają się w większości wypadków na układach sprężyn oraz amortyzatorów, natomiast aktywne wykorzystują skomplikowane systemy hydrauliczne i pneumatyczne [24]. Układy hydrauliczne, ze względu na złożoność (potrzebę użycia pomp wysokiego ciśnienia), wytwarzany hałas oraz ryzyko wycieków są bardzo rzadko stosowane w kompaktowych robotach.

Projektowany robot kołowo-kroczący wyposażony jest w 4 kończyny. Wszystkie wyposażone są w napędy związane z jazdą, poziomowaniem oraz kroczeniem. Natomiast przednie posiadają dodatkowo napęd umożliwiający skręcanie. Konstrukcja zawieszenia musi pozwalać na odtwarzanie zadanej trajektorii, a także umożliwiać zamocowanie napędów niezbędnych do realizacji ruchu w zadanych stopniach swobody (Rys. 1). Ze względu na fakt, że skręt oraz jazda realizowane są poprzez elementy zamocowane na końcu łańcucha kinematycznego, podczas syntezy uwzględniono tylko poziomowanie oraz kroczenie. Dla przeprowadzonych obliczeń przyjęte zostały przedstawione poniżej założenia.

- Zastosowanie zredukowanej liczby elementów.
- Zamontowanie napędów poziomowania i kroczenia na platformie robota.
- Wykorzystanie jednego napędu do odtworzenia zadanej trajektorii.
- Trajektorja punktu mocowania napędu jazdy powinna być prostoliniowa, prostopadła do podłoża.

Wspomniane wymagania zostały uwzględnione podczas syntezy strukturalnej, na podstawie której wybrano koncepcję układu kinematycznego opartego na czworoboku ABCD oraz łączniku między środkiem koła S a punktem B (Rys. 2). Wybrano strukturę, w której wymagany jest jeden napęd rotacyjny oraz jeden translacyjny. Obrót wahacza AB skutkuje przemieszczeniem. Opisana struktura zakłada zamocowanie napędu poziomowania w kinematycznej parze obrotowej (w punkcie A), a także napędu kroczenia (człon CD).



Rys. 2. Struktura układu kinematycznego opierająca się na czworoboku ABCD z zaznaczonymi napędami poziomowania n_1 oraz kroczenia n_2

Następnie przeprowadzono analizę geometryczną, która umożliwiła realizację zadanej trajektorii. Poszukiwane parametry, to długości członów: a , b , c , e , kąt pomiędzy elementem BC oraz łącznikiem BS (β), a także położenie punktu D (tj. współrzędne x_D , y_D w układzie o środku w punkcie A, zorientowanym wzdłuż poziomego podłoża). W przeciwieństwie do klasycznego podejścia, w którym przeprowadzany jest przegląd zupełny rozwiązań, zaproponowano wykorzystanie metaheurystycznego algorytmu optymalizacyjnego. Dla zadania zdefiniowano funkcję jakości odtwarzania trajektorii:

$$(1) \quad w_j = s_x \sum_{i=1}^n x_i^2 + (1 - s_x) \sum_{i=1}^n y_i^2,$$

gdzie: s_x - współczynnik wagowy dla odległości pomiędzy otrzymanym punktem oraz punktem zadanej trajektorii wzdłuż osi x, y - odległości otrzymanego punktu od oczekiwanej trajektorii mierzone wzdłuż osi x i osi y . Bazując

na wskaźniku jakości (1) zdefiniowano funkcję kosztu stanowiącą wskaźnik podobieństwa całej trajektorii do zadanej ścieżki. Funkcja kosztu opisana jest wzorem:

$$(2) \quad F_{cost} = \frac{4 * E_x^2 + E_y^2}{5},$$

gdzie: E_x, E_y - suma wszystkich odległości wzdłuż osi x lub y.

Bazując na przedstawionej funkcji celu oraz prostym modelu geometrycznym zależności między członami, możliwe było przeprowadzenie optymalizacji [25]. Należy zaznaczyć, że głównym celem obliczeń było otrzymanie prostoliniowej trajektorii prowadzenia środka napędu jazdy. W przeciwieństwie do algorytmów przedstawionych w literaturze [26], przedstawiona metoda nie wymagała wykorzystania przeglądu zupełnego dla żadnego z wymiarów zawieszenia. Kolejne punkty trajektorii, dla których wyliczane były współczynniki jakości, wyznaczono poprzez podział odcinka między ekstremalnymi punktami na równe części. Oznacza to, że oprócz prostoliniowości, którą głównie określa wskaźnik wyznaczony wzdłuż osi x, zbadano równomierność przemieszczenia dla kolejnych położań członu AB względem punktu A. Takie podejście miało na celu osiągnięcie liniowej zależności między sterowaniem napędem w punkcie A oraz przemieszczeniem punktu S.

Zastosowanie algorytmu Grey Wolf Optimizer w syntezie strukturalnej oraz geometrycznej kończyny robota

W prezentowanym przypadku optymalizacja została przeprowadzona algorytmem inspirowanym stadnymi zachowaniami wilka szarego. Ogólne założenia bazują na metodzie polowania watahy wilków, której osobniki podążają oraz otaczają ofiarę. Populacja stanowi przestrzeń rozwiązań, natomiast najsilniejsze osobniki stanowią rozwiązania optymalne. W każdej iteracji obliczana jest wartość funkcji celu dla każdego osobnika, wyznaczane są trzy najlepsze rozwiązania $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$. Na podstawie uzyskanych wartości obliczane są odległości wyników otrzymanych w danej iteracji od dotychczas najlepszych rozwiązań:

$$(3) \quad D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X|,$$

$$(4) \quad D_\beta = |C_2 X_\beta - X|,$$

$$(5) \quad D_\delta = |C_3 X_\delta - X|,$$

gdzie: $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ - kolejne najlepsze rozwiązania, X - analizowane rozwiązanie. Populacja jest następnie aktualizowana zgodnie ze wzorami:

$$(6) \quad X_1 = X_\alpha - A_1 D_\alpha,$$

$$(7) \quad X_2 = X_\beta - A_2 D_\beta,$$

$$(8) \quad X_3 = X_\delta - A_3 D_\delta,$$

$$(9) \quad X(i+1) = \frac{\sum_{j=1}^3 X_j}{3},$$

gdzie: $X(i+1)$ - wartość w kolejnej iteracji. Parametry A_i, C_i , w równaniach (3-8), są opisane zależnościami, które powodują zmniejszanie się zakresu przeszukiwania w pobliżu poszukiwanego optimum:

$$(10) \quad a = 2(1 - \frac{n_{akt}}{n_{max}}),$$

$$(11) \quad A = 2ar_1,$$

$$(12) \quad C = 2r_2,$$

gdzie: r_1, r_2 - losowe wartości z zakresu [0,1], n_{akt} - numer aktualnej iteracji, n_{max} - liczba wszystkich iteracji.

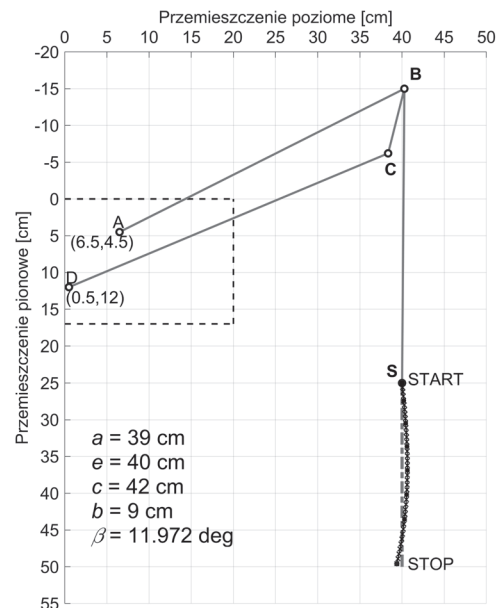
Zastosowanie algorytmu GWO, przed przystąpieniem do obliczeń, wymagało zdefiniowania wartości granicznych dla wyznaczanych parametrów, podania liczby iteracji (n_{max}) oraz osobników w populacji (N). W tabeli 1 przedstawiono parametry, jakie zostały wprowadzone do algorytmu realizującego syntezę geometryczną. Rezultaty optymalizacji zestawiono w tabeli 2. Dla uzyskanych wielkości wykreślona została trajektoria ruchu (Rys. 3). Na przedstawionej ilustracji można zauważyć, że wyznaczone punkty zamocowania łańcucha kinematycznego do platformy pozwalają na zachowanie zwartej, kompaktowej budowy robota. Ponadto otrzymane wymiary członów oraz brak krzyżujących się elementów zapewniają możliwość realizacji struktury w jednej płaszczyźnie. Uzyskana trajektoria punktu S spełnia stawiane wymagania.

Tabela 1. Parametry wejściowe dla zadania syntezy geometrycznej z wykorzystaniem algorytmu GWO

Parametr	Zakres		Stała wartość
	Dolna granica	Górna granica	
a			39 cm
b	7 cm	12 cm	
c	32 cm	45 cm	
e			40 cm
X_A			6.5 cm
Y_A			4.5 cm
X_D	0 cm	7 cm	
Y_D	10 cm	18 cm	

Tabela 2. Wymiary otrzymane w wyniku syntezy geometrycznej

Parametr	Wartość
b	9 cm
c	42 cm
β	11.97°
X_D	0.5 cm
Y_D	12 cm

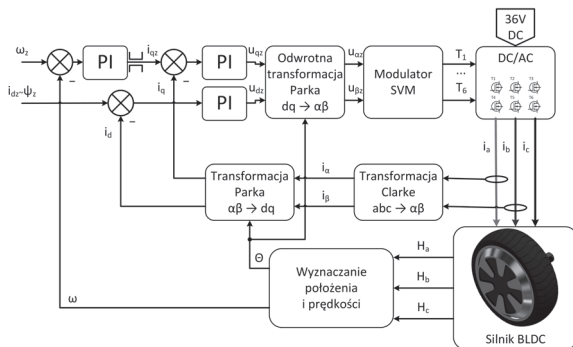


Rys. 3. Schemat uzyskanej struktury zawieszenia oraz trajektoria przemieszczenia punktu S dla wymiarów wyznaczonych GWO

Badania symulacyjne układu sterowania prędkością napędów robota

Pierwsza część obliczeń wykonanych za pomocą algorytmu GWO, która została przedstawiona w poprzedniej części artykułu, dotyczyła optymalizacji wymiarów układu zawieszenia robota. Kolejne zadania dotyczyły wyznaczenia nastaw regulatora prędkości napędu zastosowanego w robocie. Ze względu na właściwości dynamiczne zastosowano bezszczotkowe silniki prądu stałego - BLDC. W literaturze opisano wiele metod sterowania silnikami bezszczotkowymi, wśród nich można wyróżnić metody bezczujnikowe oraz wykorzystujące czujniki Halla [29]-[30]. Dodatkowo można rozróżnić algorytmy sterowania, które wprowadzają inne sposoby kluczowania falownika: sterowanie trapezoidalne [31], metodę sinusoidalną [32], sterowanie polowo-zorientowane (Field Oriented Control - FOC) [33] oraz bezpośrednie sterowanie momentem (Direct Torque Control - DTC) [34].

W przypadku opisywanego robota zastosowano układ regulacji prędkości FOC, którego schemat przedstawiono na Rys. 4. Jest to struktura, w której napięcie sterujące przedstawiane jest w postaci wektora. W sterowaniu polowo-zorientowanym wyróżnia się dwa tory regulatorów prądu przedstawianych w wirującym układzie współrzędnych dq - prąd w osi d odpowiada strumieniowi elektromagnetycznemu, natomiast q prędkości. Po przekształceniu do nieruchomego układu $\alpha\beta$ możliwe jest wyznaczenie sygnałów sterujących falownikiem poprzez zastosowanie modulatora SVM, w którym przestrzeń podzielona jest na 6 sektorów. Każda kombinacja stanu kluczy tranzystorowych odpowiada jednemu z możliwych wektorów. Modulator wyznacza czas załączenia danego wektora, dzięki czemu możliwe jest bezpośrednie sterowanie napięciem zasilającym.



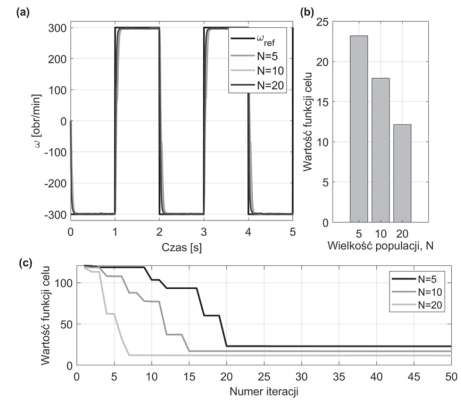
Rys. 4. Struktura układu sterowania prędkością FOC dla silnika BLDC

Model napędu wraz ze strukturą FOC został zaimplementowany w programie Matlab/Simulink. Nastawy regulatora prędkości (wzmocnienia członu proporcjonalnego K_p oraz całkującego K_i) zostały wyznaczone poprzez minimalizację prostej funkcji celu (13), w której porównywano wartość prędkości mierzonej oraz zadanej.

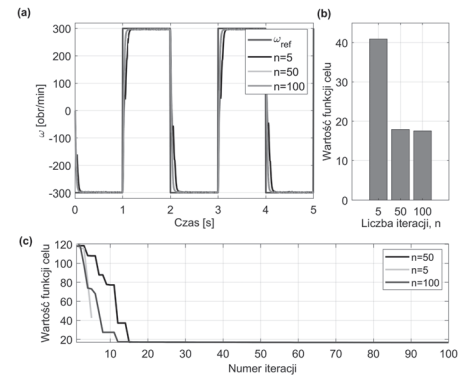
$$(13) \quad F_{cBLDC} = \frac{\sum_{k=1}^K |\omega_{refk} - \omega_k|}{K},$$

gdzie: ω_{ref} - prędkość zadana, ω - prędkość mierzona, K - liczba próbek. W ramach badań procesu optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu GWO, przeprowadzono obliczenia, które uwzględniały różne wartości wybranych parametrów algorytmu GWO (wielkość populacji oraz liczba iteracji). Porównanie otrzymanych wyników zestawiono na wykresach (Rys. 5, Rys. 6).

Można zauważyć, że rozszerzanie populacji przyczyniło się do poprawy procesu optymalizacji (Rys. 5), jednak

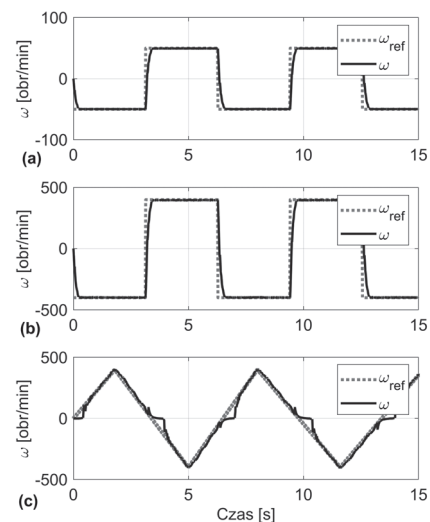


Rys. 5. Optymalizacja nastaw regulatora prędkości za pomocą algorytmu GWO - wpływ zdefiniowanej liczby osobników (przebiegi zmiennych stanu (a), ostateczna wartość funkcji celu (b), wartości błędów w kolejnych iteracjach obliczeń (c))



Rys. 6. Optymalizacja nastaw regulatora prędkości za pomocą algorytmu GWO - wpływ zdefiniowanej liczby iteracji (przebiegi zmiennych stanu (a), ostateczna wartość funkcji celu (b), wartości błędów w kolejnych iteracjach obliczeń (c))

nadmierne zwiększanie tego parametru powoduje wydłużenie czasu obliczeń.



Rys. 7. Przebiegi prędkości w strukturze sterowania FOC zastosowanej dla silnika BLDC - prostokątna trajektoria zadana (a), prostokątna trajektoria zadana przy zmienionej wartości w stanie ustalonym (b), a także stopniowe wymuszanie zmian w obu kierunkach (c)

Badania wykazują, że występuje minimalna wartość liczby iteracji, dla danego zadania, która umożliwia osiągnięcie odpowiedniego poziomu dokładności wyznaczania optymalizowanych parametrów (Rys. 6). Jednak w kolejnych krokach

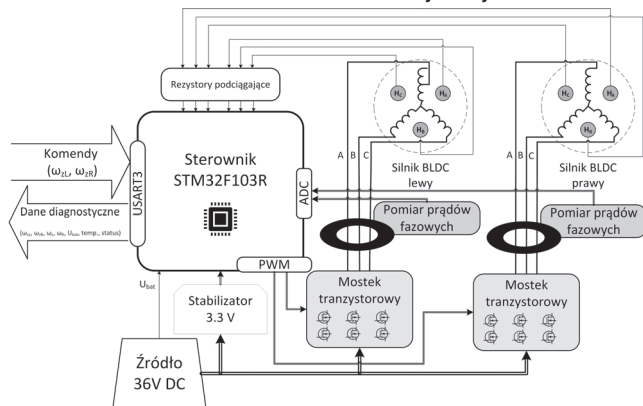
przetwarzania danych przez algorytm GWO, błąd jest na stałym, podobnym poziomie. Korzystna może być modyfikacja algorytmu: wprowadzenie bezpośredniego warunku zatrzymania lub obserwacja zmian funkcji celu (wspomniane działania są analogicznie do stosowanych w treningu sieci neuronowych). Należy zaznaczyć, że w poszczególnych testach algorytm rozpoczynał działanie z wcześniej ustalonymi osobnikami (pomijano wstępne losowanie).

Model układu napędowego, który optymalizowano za pomocą algorytmu GWO, został poddany testom symulacyjnym. Równania silnika BLDC zostały sparаметryzowane na podstawie dokumentacji technicznej. Wprowadzone zostały również ograniczenia zmiennych stanu, które odpowiadały możliwościom rzeczywistego napędu. Zastosowana struktura FOC pozwala na uzyskanie prędkości wyższych od znamionowych poprzez osłabienie strumienia, jednak ze względu na planowane wykorzystanie napędów (oraz wynikające z tego prędkości), nie przekraczano 2/3 prędkości nominalnej. Warto wspomnieć, że jeden obrót koła, którego średnica wynosi 6,5", odpowiada przebytej drodze równej około 0,5 m. Wybrane wyniki symulacji zostały przedstawione na ilustracji (Rys. 7).

Opis konstrukcji robota

Założeniem projektowym układu jezdnego robota kołowo-krocącego było szybkie przemieszczenie po płaskich, utwardzonych powierzchniach. W przypadku projektowanego prototypu zastosowano cztery bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC). Podstawową zaletą wybranych silników jest ich konstrukcja - wbudowane są bezpośrednio w koła, a wirnik stanowi zewnętrzny element silnika, zatem nie jest wymagane stosowanie dodatkowych układów przekładni. Ponadto, silniki BLDC charakteryzują się dużą mocą przy zachowaniu kompaktowych rozmiarów [27]-[28], coraz częściej są stosowane w niewielkich pojazdach (np. hulajnogi, skutery elektryczne, napędy rowerów, itd.). Do napędu robota zaimplementowano silniki o mocy 250W oraz nominalnej prędkości równej 1500 obr/min. Dzięki wspomnianej wcześniej budowie, możliwe było bezpośrednie zamocowanie napędów na końcach struktury zawieszania.

Układ regulacji został zaimplementowany w sterowniku STM32F103R. Do wyznaczenia prędkości zostały zastosowane czujniki Halla wbudowane w silnik. Schemat struktury systemu mikroprocesorowego przedstawiono na Rys. 8. Do sterowania układem zawieszania wykorzystano dwa na-



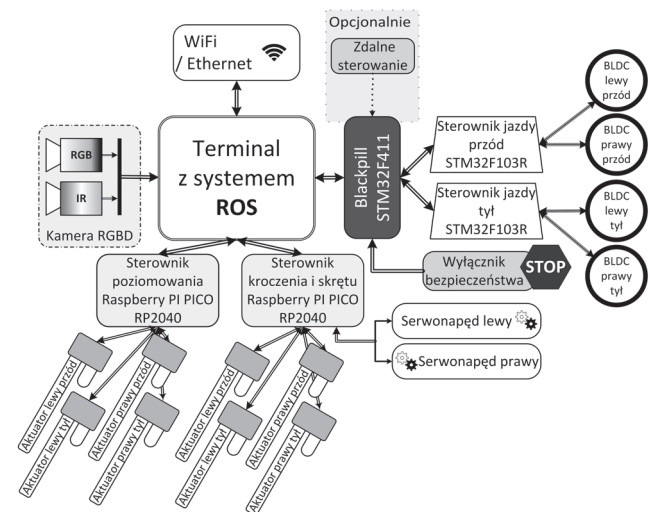
Rys. 8. Schemat układu mikroprocesorowego

napędy. Pierwszy z nich, zgodnie z wymaganą strukturą łańcucha kinematycznego, jest aktuatorem liniowym. Drugi z napędów, który odpowiedzialny jest za poziomowanie (podnoszenie kończyny), jest napędem dołączonym w przegubie rota-

cyjnym. Ze względu na potrzebę utrzymania dużej wartości momentu obciążenia, przy jednoczesnym utrzymaniu prędkości równej 0, także w tym przypadku zastosowano aktuator liniowy (przemieszczenie liniowe zostało przekształcone w obrót przy pomocy prostego układu korbowego). Zastosowano siłowniki elektryczne HIWIN LAS150, które charakteryzują się wysoką wartością siły trzymającej. Skok siłowników wynosi 150 mm, jednak ze względu na chęć uzyskania symetrii sterowania oraz fakt, że otrzymany wymiar elementu c nie leży w połowie zakresu regulacji, został on ograniczony programowo do 90 mm. Przedstawione aktulatory liniowe składają się z silnika DC z magnesami trwałymi połączonego za pomocą przekładni ze śrubą napędową. Nominalna wartość napięcia zasilającego wynosi 24 V. Natomiast, aby umożliwić kontrolę prędkości oraz kierunku ruchu, w układzie zastosowano mostki H.

Zmiana toru ruchu jest możliwa poprzez zastosowanie silników prądu stałego z magnesami trwałymi (moment nominalny - 4,8 Nm, nominalne napięcie zasilania - 24 V).

Układy sterowania położeniem aktuatorów liniowych zostały zaimplementowane w dwóch mikrokontrolerach Raspberry PI PICO RP2040. Pierwszy odpowiada za obsługę 4 napędów poziomowania, natomiast kolejny za obsługę 4 napędów kroczenia. Jako główny cel bieżącego etapu badań założono uruchomienie prototypu w celu przeprowadzenia testów funkcjonalnych całego robota. Z tego powodu zaimplementowano standardową kaskadową strukturę sterowania położeniem.



Rys. 9. Struktura systemu sterowania

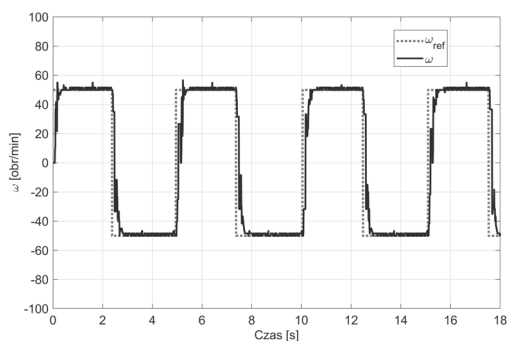
Przedstawione napędy stanowią elementy wykonawcze robota kołowo-krocącego. W celu jego prawidłowego funkcjonowania niezbędne jest utworzenie nadrzędnego systemu pozwalającego na synchronizację działania. Należy przy tym pamiętać, że główny sterownik robota musi również umożliwiać pozyskiwanie danych z sensorów otoczenia (np. w celu wykrywania przeszkód, mierzenia odległości, mapowania pomieszczenia, czy rozpoznawania elementów istniejącej infrastruktury) [35] - [37]. Przetworzone dane wejściowe zostają zinterpretowane, następnie generowane są polecenia dla poszczególnych napędów. Komunikacja pomiędzy głównym sterownikiem oraz modułami, które przedstawiono wcześniej, odbywa się poprzez porty szeregowo. Zabezpieczenie transferu danych przed wystąpieniem błędów, a także unikanie interpretacji danych uszkodzonych przez zakłócenia jest realizowane poprzez odpowiednio zdefiniowaną strukturę ramki komunikatów. W poszczególnych pakietach wprowadzana

jest suma kontrolna, która jest wyliczana przez odbiornik na podstawie otrzymanych danych oraz porównywana z wartością otrzymaną. Jeśli wartości różnią się, ramka zostaje pominięta. Komunikaty zostają przesyłane do kolejnych modułów z częstotliwością 10 Hz. Moduły odpowiedzialne za obsługę konkretnych napędów posiadają bezpośredni dostęp tylko do danych z enkoderów i sensorów dołączonych bezpośrednio do danego mikrokontrolera (Rys. 9). Należy zauważyć, że w transferze komunikatów do sterowników napędów jazdy pośredniczy sterownik Blackpill z mikroprocesorem STM32F411. Dzięki zastosowanej strukturze możliwe jest przemieszczanie oraz zatrzymanie robota niezależnie od nadrzędnych systemów sterowania. Pozwala to na zapewnienie bezpieczeństwa, a także bezpośrednie zdalne sterowanie poprzez aparaturę RC.

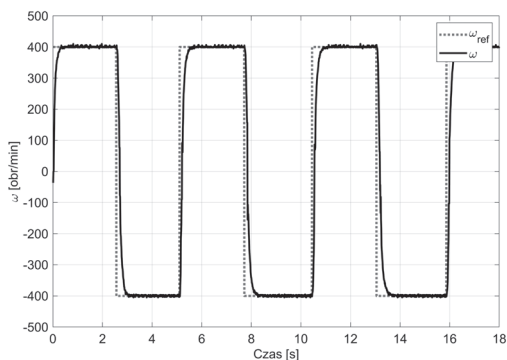
Eksperyment

Przedstawiona struktura sterowania napędami robota została przetestowana eksperymentalnie. Zadawane sygnały referencyjne były analogiczne do przetestowanych podczas testów symulacyjnych. Należy przy tym wspomnieć, że eksperymenty zostały wykonane bez stosowania dodatkowego sprzętu, a jedynie wykorzystując sensory i system mikroprocesorowy wbudowany w prototyp robota. Sformatowane dane pomiarowe zostały przesłane do komputera poprzez port szeregowy.

Jak widać na załączonych przebiegach prędkości, uzyskano zadowalającą dynamikę - sygnał mierzony podąża za trajektorią zadaną, brak jest uchybów ustalonych, a także wyeliminowane są przeregulowania oraz oscylacje (Rys. 10-12).



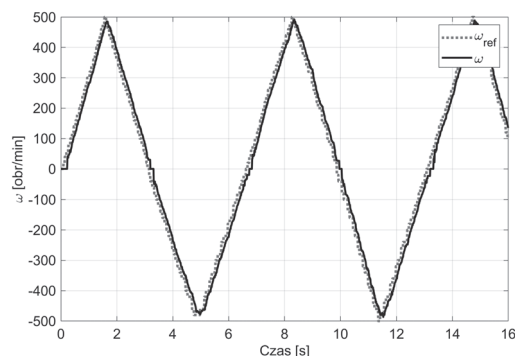
Rys. 10. Przebieg prędkości odczytany ze sterownika - praca przy niskiej prędkości



Rys. 11. Przebieg prędkości odczytany ze sterownika - nawroty o wyższej prędkości

Podsumowanie

W artykule przedstawiono opis napędów oraz układów sterowania zastosowanych dla robota kołowo-kroczącego.



Rys. 12. Przebieg prędkości odczytany ze sterownika - stopniowy narost prędkości

Zaprezentowano metodykę oraz wskazano zalety stosowania metaheurystycznych algorytmów optymalizacyjnych w syntezie układów mechanicznych robotów, a także strojeniu regulatora prędkości. W niniejszej pracy, w wymienionych powyżej zadaniach zaaplikowano algorytm Grey Wolf Optimizer. Przytoczone wyniki badań symulacyjnych oraz dane zgromadzone podczas eksperymentu potwierdzają wstępne założenia teoretyczne. Napęd elektryczny robota odtwarza zadaną prędkość bardzo precyzyjnie, zmienne stanu są kształtowane dynamicznie.

Przytoczona struktura systemu sterowania stanowi szkielet sieci umożliwiającej podstawowe funkcjonowanie robota, jednocześnie zapewniając kontrolę wszystkich napędów. W ramach dalszych badań planowana jest jej rozbudowa o dodatkowe komponenty sensoryczne wykorzystujące elementy sztucznej inteligencji w przetwarzaniu danych, między innymi neuronowy detektor przeszkód. Ponadto, klasyczne struktury sterowania napędami poziomowania i kroczenia zostaną zastąpione układami z zaawansowanymi regulatorami (np. rozmytymi lub adaptacyjnymi). Podczas syntezy układów sterowania zostaną również wykorzystane algorytmy optymalizacyjne. Dodatkowo efektywność metody Grey Wolf Optimizer zostanie porównana z innymi algorytmami metaheurystycznymi inspirowanymi obserwacjami natury.

Autorzy: mgr inż. Mateusz Malarczyk, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.malarczyk@pwr.edu.pl; mgr inż. Radosław Stanisławski, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: radoslaw.stanislawski@pwr.edu.pl; mgr inż. Mateusz Żychlewicz, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.zychlewicz@pwr.edu.pl; dr inż. Jarosław Szrek, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, e-mail: jaroslaw.szrek@pwr.edu.pl; dr hab. inż. Marcin Kamiński, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: marcin.kaminski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Grau A., Indri M., Bello L.L., Sauter T.: Industrial robotics in factory automation: From the early stage to the Internet of Things, IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6159-6194, 2017, doi:10.1109/IECON.2017.8217070.

- [2] Wang X., Zheng L.: Design of multi-robot cooperative transport system, 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), pp. 1370-1373, 2022, doi:10.1109/ICSP54964.2022.9778805.
- [3] Culler D., Long J.: A prototype smart materials warehouse application implemented using custom mobile robots and open source vision technology developed using EmguCV, *Procedia Manufacturing*, Vol. 5, 2016, pp. 1092-1106, doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.080.
- [4] Cardona M., Palma A., Manzanares J.: COVID-19 pandemic impact on mobile robotics market, 2020 IEEE ANDESCON, pp. 1-4, 2020, doi:10.1109/ANDESCON50619.2020.9272052.
- [5] Park, H., Kim, S., Park, N., Yang, H., Park, Y., Kim, S., Kang, Y.: Design of tracked vehicle with passive mechanism for uneven terrain, 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, pp. 3132-3136, 2006, doi:10.1109/sice.2006.314818.
- [6] Yang W.-S., Lu W.-C., Lin P.-C.: Legged robot running using a physics-data hybrid motion template, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 37(5), pp. 1680-1695, 2021, doi:10.1109/tro.2021.3065241.
- [7] Semini C., Wieber P.-B.: Legged robots, *Encyclopedia of Robotics*, Springer, pp. 1-11, 2020, doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_59-1.
- [8] Li M., Jiang Z., Wang P.: Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait, *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 188-198, 2014, doi:https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60043-3.
- [9] Hutter M., Gehring C., Lauber A., Gunther F., Bellicoso C.D., Tsounis V., Fankhauser P., Diethelm R., Bachmann S., Bloesch M., Kolvenbach H., Bjelonic M., Isler L., Meyer K.: ANYmal - toward legged robots for harsh environments, *Advanced Robotics*, Vol. 31, No. 17, pp. 918-931, 2017, doi:10.1080/01691864.2017.1378591.
- [10] Wang S., Cui L., Zhang J., Lai J., Zhang D., Chen K., Zheng Y., Zhang Z., Jiang Z.P.: Balance control of a novel wheel-legged robot: design and experiments, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6782-6788, 2021, doi:10.1109/ICRA48506.2021.9561579.
- [11] Cui Z., Xin Y., Liu S., Rong X., Li Y.: Modeling and control of a wheeled biped robot, *Micromachines*, Vol. 13, No. 747, 2022, doi:https://doi.org/10.3390/mi13050747.
- [12] Sakama S., Tanaka Y., Kamimura A.: Characteristics of hydraulic and electric servo motors, *Actuators*, Vol. 11, No. 11, 2022, doi:https://doi.org/10.3390/act11010011.
- [13] Neß W., Raggl K.: E-motor types for secondary electric drives in comparison, *MTZ Worldw*, Vol. 83, pp. 40-45, 2022, doi:https://doi.org/10.1007/s38313-021-0755-7.
- [14] Attaianesi C., Pagano E., Perfetto A.: Guide to the selection of electric actuators for applications in robotics, 5th International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments', pp. 1578-1581, 1991, doi:10.1109/ICAR.1991.240506.
- [15] Hanschek A.J., Bouvier Y.E., Jesacher E., Grbovic P.J.: Analysis and comparison of power distribution system topologies for low-voltage DC-DC automated guided vehicle applications, *Energies*, Vol. 15, No. 6, 2022, doi:https://doi.org/10.3390/en15062012.
- [16] Dong C., Yu Z., Chen X., Chen H., Huang Y., Huang Q.: Adaptability control towards complex ground based on Fuzzy Logic for humanoid robots, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 30, No. 6, pp. 1574-1584, 2022, doi:10.1109/TFUZZ.2022.3167458.
- [17] Savsani P., Jhala R.L., Savsani V.J.: Comparative study of different metaheuristics for the trajectory planning of a robotic arm, *IEEE Systems Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 697-708, 2016, doi:10.1109/JSYST.2014.2342292.
- [18] Chen X., He J.: Cooperative planning of dual arm robot based on Improved Particle Swarm Optimization, 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), pp. 632-635, 2021, doi:10.1109/ICCASIT53235.2021.96335252.
- [19] Homchanthanakul J., Manoonpong P.: Continuous online adaptation of bioinspired adaptive neuroendocrine control for autonomous walking robots, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol. 33, No. 5, pp. 1833-1845, 2022, doi:10.1109/TNNLS.2021.3119127.
- [20] Fahmizal, Kuo C.: Development of a fuzzy logic wall following controller for steering mobile robots, 2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), pp. 7-12, 2013, doi:10.1109/iFuzzy.2013.6825401.
- [21] Yang X.-S.: *Nature-inspired optimization algorithms*, Elsevier, 2014.
- [22] Knypinski L., Paweloszek K., Le Menach Y.: Optimization of low-power line-start PM Motor using Gray Wolf Metaheuristic Algorithm, *Energies*, Vol. 13, No. 1186, 2020, doi:https://doi.org/10.3390/en13051186.
- [23] Knypinski L.: Constrained optimization of line-start PM motor based on the Gray Wolf Optimizer, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-10, 2021.
- [24] Jiregna I., Sirata G.: A review of the vehicle suspension system, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 4(44), No. 2, pp. 109-114, 2020, doi:10.30464/jmee.2020.4.2.109.
- [25] Szrek J.: Method of synthesizing mobile wheel-legged robot, 20th Research-Educational Conference in Theory of Machines, Vol. 1, pp. 207-213, 2006.
- [26] Sperzynski P., Szrek J., Gronowicz A.: Synteza geometryczna mechanizmu realizującego trajektorię prostoliniową odcelowaną, *Acta mechanica et automatica*, Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 124-129.
- [27] Mach V., Kovar S., Valouch J., Adamek M.: Brushless DC motor control on Arduino platform, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 94, No. 11, pp. 105-107, 2018, doi:10.15199/48.2018.11.24.
- [28] Krykowski K.: Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2011.
- [29] Gamazo-Real J.C., Vázquez-Sánchez E., Gómez-Gil J.: Position and speed control of Brushless DC motors using sensorless techniques and application trends, *Sensors*, Vol. 10, No.7, pp. 6901-6947, 2010, doi:https://doi.org/10.3390/s100706901.
- [30] Goryca Z.: Bezszcotkowe silniki prądu stałego : konstrukcje i sterowanie, *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, Vol. 4, No.3, pp. 56-63, 2013.
- [31] Mousmi A., Abbou A., El Houm Y.: Trapezoidal control of Brushless DC motor based on DSP F28335, 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), pp. 1-5, 2017, doi:10.1109/WITS.2017.7934602.
- [32] Kolano, K., Drzymała, B., Gęca, J. Sinusoidal Control of a Brushless DC Motor with Misalignment of Hall Sensors, *Energies*, Vol. 14, No. 3485, 2021, doi:https://doi.org/10.3390/en14133845
- [33] Sharma P.K., Sindekar A.S.: Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC, 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication, pp. 485-492, 2016, doi:10.1109/ICGTSPICC.2016.7955350.
- [34] Ozturk S.B., Toliyat H.A.: Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, pp. 165-171, 2017, doi:10.1109/IEMDC.2007.383571.
- [35] Hao C.K., Mayer N.M.: Real-time SLAM using an RGB-D camera for mobile robots, 2013 CACS International Automatic Control Conference (CACS), pp. 356-361, 2013, doi:10.1109/CACS.2013.6734160.
- [36] Nickels K., Gassaway J., Bries M., Anthony D., Fiorani G.W.: Persistent mapping of sensor data for medium-term autonomy, *Sensors*, Vol. 22, No. 14(5427), 2022, doi:https://doi.org/10.3390/s22145427.
- [37] Malarczyk M., Tapamo J.-R., Kaminski M.: Application of neural data processing in autonomous model platform — a complex review of solutions, design and implementation, *Energies*, Vol. 15, No. 4766, 2022, doi:https://doi.org/10.3390/en15134766.