

# Układy lokomocji w zastosowaniu do robota poruszającego się po powierzchniach pionowych

Jarosław Rychlica, Łukasz Zieleniewicz, Łukasz Chrobot, Jan Gorczyca, Maciej Mikulski

Koło Naukowe Mechatroniki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

**Streszczenie:** Praca jest poświęcona rozważaniom na temat robota zdolnego do poruszania się po powierzchniach pionowych i poziomych z możliwością samodzielnej zmiany płaszczyzny ruchu. Zaprezentowano najczęściej stosowane układy lokomocji, ich zalety i wady. Następnie krótko opisano rozwiązania umożliwiające robotowi poruszanie się po płaszczyznach wertykalnych. Przedyskutowano plusy i minusy układów podczas ruchu pionowego, po czym zaprezentowano analizę konkretnego rozwiązania, problemy i walory takiego podejścia.

**Słowa kluczowe:** silnik BLDC, układ lokomocji, układ ruchu, robot chodzący po ścianie, zmiana płaszczyzny ruchu

## 1. Wstęp

Roboty mobilne są jednymi z najczęściej budowanych robotów na świecie. Ich konstruktor podczas projektowania musi odpowiedzieć sobie na szereg pytań związanych z przeznaczeniem maszyny oraz sposobem optymalnej i ekonomicznej konstrukcji. Należy przemyśleć takie zagadnienia jak układ lokomocji, układ napędowy i sposób jego przeniesienia, system czujników zapewniający optymalną pracę, układy sterujące i wykonawcze, sposób łączności oraz sztuczna inteligencja. W artykule zostały przedstawione główne układy lokomocji wykorzystywane w robotach, a następnie ocenione pod względem zastosowania ich w robocie chodzącym po powierzchniach pionowych. Oddzielnym zagadnieniem jest problem „przyczepienia” mechanizmu do ściany, którego rozwiązania również pokrótce zostaną poruszone. Maszyna ma być przeznaczona do poruszania się po równych powierzchniach typu szkło, beton, cegła. Dodatkowo mechanizm musi samodzielnie zmieniać płaszczyznę przemieszczania z poziomej na pionową. Robot taki może wykonywać różne zadania, np. robienie zdjęć z wysokości, inspekcja trudno dostępnych miejsc, dokonywanie pomiarów.

## 2. Przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcji układu ruchu

Sposób lokomocji robota jest ściśle związany z jego działaniem oraz trybem pracy. Jeżeli konstruktorowi zależy na szybkości poruszania się układu oraz na prostocie, najlepszym wyborem będą układy kołowe. Jeżeli natomiast robot ma pokonać trudne przeszkody (schody lub inne nierówności), to najsprawniejszy jest układ krokowy, który jest dużo bardziej skomplikowany, kosztowny, trudny w sterowaniu i jak na razie dość powolny. Układ gąsienicowy jest pewnego rodzaju rozwinięciem układu kołowego i jego zalet nie trzeba wyjaśniać (większa powierzchnia styku z podłożem). Jego wadą jest zwiększone tarcie przy skręcaniu.

Omówione dalej dobrze znane i sprawdzone układy zapewniające mobilność mogą być modyfikowane lub łączone ze sobą, zwiększając funkcjonalność robota. Układy latające, pływające czy pelzające nie są rozważane, ponieważ ich stosowanie w omawianym przypadku byłoby mało praktyczne.

### 2.1. Układy kołowe

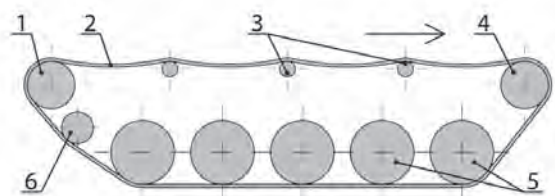
Koła są najpowszechniej stosowanym rozwiązaniem układu ruchu robotów. Ich zaletą jest szybkość poruszania się i łatwiejsze sterowanie. Napęd ten nie sprawdza się jednak na terenie nierównym. Przeszkody mogą blokować się między kołami, co prowadzi do unieruchomienia. Z tego powodu stosowanie układu jest ograniczone do równych i twardych powierzchni (miękkie podłoże, np. sypki piasek, głębokie błoto czy miękki śnieg mogą również unieruchomić robota). Najczęściej stosowanym pojazdem jest układ czterokołowy ze skrętnymi kołami przednimi. Rozwiązań w zależności od potrzeb jest jednak bardzo wiele.

Większa liczba kół oznacza poprawienie stabilności robota i jego przyczepności. W celu poprawy przyczepności na nierównym terenie stosuje się zawieszenie przegubowe, zapobiegające przewracaniu się na pochyłościach. Układ kołowy nie jest również dobrym rozwiązaniem, jeżeli robot ma pokonywać szczeliny. Wadą jest również to, że w przypadku przewrotki większość robotów zostanie unieruchomiona.

### 2.2. Układy gąsienicowe

Układ gąsienicowy jest mechanizmem umożliwiającym poruszanie się pojazdów w terenie za pomocą gąsienic, które zwiększają powierzchnię styku z podłożem, zmniejszają nacisk jednostkowy oraz poprawiają przejeźdźność. Powszechnie jest stosowany w czołgach, maszynach budowlanych, skuterach śnieżnych i ciężkich maszynach poruszających się po nawierzchniach nieutwardzonych. Istnieją także zestawy umożliwiające montaż gąsienic w samochodach terenowych oraz quadach (w miejsce kół).

Podstawowy układ gąsienicowy (rys. 1) składa się z zamkniętej taśmy gąsienicowej (2), która otacza koła nośne (5).



Rys. 1. Schemat budowy gąsienicy [1]

Fig. 1. Tracks diagram [1]

W większości przypadków spotyka się także oddzielne koło napędzające (1), koło kierunkowe (4) oraz rolki podtrzymujące (3) i koło napinające (6). Całość jest połączona z pojazdem za pomocą zawieszenia, które resorują koła nośne.

Jak działa układ gąsienicowy? Pojazd przemieszcza się przez obracanie koła napędzającego (często jest to jedno z kół nośnych), które zazębia się z taśmą gąsienicy i nadaje jej ruch. Górna część gąsienicy porusza się nad kołami w kierunku ruchu pojazdu, natomiast dolna część układu porusza się po podłożu i tworzy tor dla kół nośnych, a więc całego pojazdu.

Plusami takiego układu jest poprawienie możliwości terenowych pojazdu przez zmniejszenie nacisku jednostkowego (ogranicza grzęźnięcie i poślizg) oraz zdolność do pokonywania przeszkód.

Niestety, układ ten ma także wady: mała trwałość, duże opory tarcia, niszczenie nawierzchni utwardzonych (możliwe jest stosowanie gumowych nakładek). Ponadto rozerwanie lub spadnięcie gąsienicy unieruchamia pojazd.

Napęd gąsienicowy świetnie sprawdza się w trudniejszym terenie. Pozwala na łatwiejsze manewrowanie i poruszanie. Nie jest także systemem zbyt skomplikowanym. Najprostsza wersja napędu to dwie gąsienice napędzane przez dwa oddzielne silniki. Bardziej zaawansowane konstrukcje posiadają czujniki, które dostarczają informacje do komputera, który decyduje, w jakim kierunku ma jechać robot. Cały proces odbywa się w jednostce sterującej, co zmniejsza prawdopodobieństwo popsucia się maszyny. Układ napędowy jest tylko oddzielnym modulem, który może być w każdej chwili wymieniony.

### 2.3. Układy kroczące

Maszyny kroczące świetnie sprawdzają się w ciężkim terenie. Układ kroczący nie jest jednak w powszechnym użyciu z powodu trudności ze sterowaniem oraz powolnością w stosunku do układów kołowych poruszających się po płaskich nawierzchniach.

Problemy z układem kroczącym można podzielić na trudności związane z układem sterowania oraz trudności związane z samą realizacją mechaniczną chodzenia, tj. dynamiką ruchu oraz utrzymaniem równowagi. Do ich rozwiązania trzeba znać położenie wszystkich kończyn względem siebie, wiedzieć, które kończyny mają kontakt z podłożem i w którym punkcie, posiadać dane o prędkości i kierunku ruchu, położeniu ciała względem pionu, przyspieszeniach działających na ciało oraz przeciążeniach zespołów napędowych.

Jeśli równowaga zostanie utracona, można ją odzyskać, manewrując ruchomymi masami, przy czym należy pamiętać, że akcja powoduje reakcję, tak więc ruch masy w jedną stronę spowoduje jednocześnie siłę oddziałującą na robota w drugą, co może doprowadzić do przewrócenia. Drugim sposobem jest przestawienie nogi tak, aby środek ciężkości znowu znalazł się nad obszarem podstawy. Ludzkie ciało wykonuje takie manewry intuicyjnie, robota trzeba takich reakcji nauczyć przez odpowiednie zaprogramowanie.

Trudności przy układzie kroczącym są różne i zależą od zastosowanego sposobu poruszania oraz liczby nóg, która ma wpływ na liczbę możliwych rodzajów chodów.

Układy kroczące budowanych maszyn czerpią swoje pomysły głównie z obserwacji natury. Roboty mogą mieć postać

skaczących 1-nożnych, przez 2-nożne, wzorowane na ruchu człowieka, czy najpopularniejsze 6-nożne przypominające owady, do wielonożnych złożonych z wielu segmentów generujących ruch wężowy jak stonoga. Większa liczba nóg gwarantuje większą stabilność. Stabilność określa wielokąt podparcia tworzony przez punkty styku nóg robota z podłożem. Jeżeli masa znajduje się nad tym wielokątem, to układ jest stabilny. Jeżeli masa przesunie się poza wielokąt podparcia, to robot przewraca się.

Ze względu na rodzaj stabilności wyróżniamy maszyny statycznie, quasi-statycznie oraz dynamicznie stabilne. Gdy zależy nam na szybkim poruszaniu się robota, układ powinien być stabilny dynamicznie. Niestety, taki układ nie potrafi utrzymać równowagi po zatrzymaniu się. Aby robot mógł wykonywać precyzyjne ruchy, musi być stabilny statycznie w każdym momencie ruchu (oczywiście skutkuje to dużą powolnością maszyny). Maszyny quasi-statyczne przez krótki okres pomiędzy statycznością stabilną przechodzą w statyczność dynamiczną. Owady takie jak karaluchy (owady 6-nożne stabilne statycznie) przechodzą podczas szybkich ruchów w „stan lotu”, w którym charakteryzują się jedynie stabilnością dynamiczną. Istnieją momenty, w których żadne z odnóży nie dotyka ziemi.

Wyróżniamy kilka rodzajów chodu, tj. bieg, chód, chód spacerowy, chód szybki itd. Wyróżnikiem rodzaju chodu jest kolejność przestawień nóg. Chód może być symetryczny, asymetryczny, swobodny, periodyczny, za przewodnikiem, falowy itd. Aby opisać chód, stosuje się diagramy chodu [2].

Nogi maszyn kroczących nie mogą być połączone na sztywno, ponieważ drgania powstałe od uderzeń przy wykonywaniu ruchu powodowałyby niszczenie konstrukcji.

## 3. Sposób „przyczepienia” mechanizmu mobilnego robota do powierzchni płaskiej

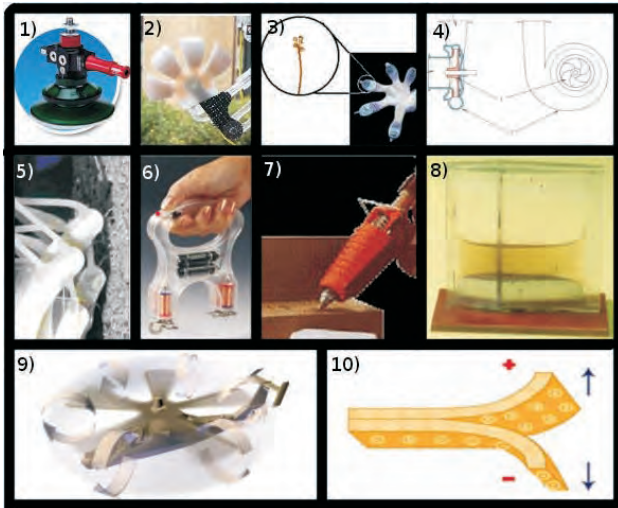
Jak wiadomo, grawitacji nie da się oszukać. Żaden pojazd, czy to wyposażony w koła, nóżki, czy w gąsienice, nie pojeździe po pionowej ścianie. Konieczne jest zastosowanie rozwiązania, które równoważyłoby siłę, z jaką przyciąga nas nasza planeta. Realizacja tego celu jest możliwa na wiele sposobów. Niektóre są proste i łatwo dostępne, inne bardziej wymyślne i skomplikowane, a ich realizacja trudna i kosztowna. Omówimy tu kilka koncepcji, a w dalszej części artykułu spróbujemy wybrać najodpowiedniejsze rozwiązanie do naszego robota.

### a) Przyssawki ciśnieniowe

Dzięki zastosowaniu przyssawek ciśnieniowych robot może przyczepić się do gładkiej powierzchni jak szkło. Przyssawki nadają się zarówno do robota kroczącego, jak również gąsienicowego. Na rynku dostępna jest duża oferta przyssawek w wielu wymiarach. Przyssawki są stosunkowo łatwe i bezpieczne w stosowaniu. Potrafią utrzymać duże ciężary, wymagają jednak źródła dodatkowego zasilania.

### b) Przyssawki mechaniczne z elastomeru

Elastomer to polimerowe tworzywo sztuczne wyróżniające się zdolnością do odwracalnej deformacji pod wpływem siły mechanicznej, zachowując jednocześnie jednolitość struktury. Zapewniają dużą powierzchnię styku pomiędzy nogą a podłożem. Stosowanie ograniczone do gładkich powierzchni.



**Rys. 2.** 1) przysawka ciśnieniowa, 2) mechaniczne przysawki z elastomeru, 3) włos gekona, 4) pompa odśrodkowa, 5) haczyki, 6) elektromagnes, 7) klej termoplasty, 8) zjawisko napięcia powierzchniowego, 9) łopaty śmigłowca, 10) przyleganie elektrostatyczne

**Fig. 2.** 1) pressure cup, 2) mechanical suction of elastomer, 3) gecko hair, 4) centrifugal pump, 5) hooks, 6) electromagnet, 7) thermoplastic hot melt adhesive, 8) surface tension effect, 9) helicopter blades, 10) electrostatic

**c) Siły van der Waalsa**

Specjalny materiał powstał na podstawie obserwacji gekona, który doskonale wspina się po powierzchniach pionowych, zarówno gładkich, jak i chropowatych. Dzięki rozgałęziającym się mikro włoskom na łapkach, gekon wykorzystuje siłę van der Waalsa do przyklejania się do powierzchni. Stworzono włoski gekona o grubości 2 atomów. Taki sposób przyczepienia jest bardzo silny.

**d) System ssący**

Działa na podobnej zasadzie jak odkurzacz. Zasysa powietrze spod robota, tworząc podciśnienie. Ograniczeniem jest stosunkowo niewielki ciężar robota.

**e) Mikrohaczyki i haczyki**

Niewielkie kolce (np. haczyki wykorzystywane w wędkarstwie) umieszczone w odnóżach robota pozwalają mu na wspinanie się po chropowatych powierzchniach, jak beton lub cegła.

**f) Przysawki wodne**

Poprzez miniaturowe otwory wykonane w płaskiej blaszce pompowane są kropelki wody. Przyklejenie się materiału do powierzchni jest możliwe dzięki sile napięcia powierzchniowego. Im mniejsze otwory i im gęściej umieszczone, pozwalają na przymocowanie większego ciężaru. Pompowanie cząstek wody jest możliwe w dwie strony i regulowane jest przez pole elektryczne. Otwory o średnicy 1000 razy mniejszej od powierzchni przekroju ludzkiego włosa umieszczone na powierzchni blaszki o szerokości 7,5 cm pozwoli na utrzymanie ciała o wadze 130 kg. Możliwe jest przyczepienie się do takich powierzchni, jak drewno, plastik, szkło, metal, cegła a nawet papier ścierny. Wymagane zasilanie jest niewielkie. Wystarczy zwykła bateria.

**g) Śmigło**

Specjalnie zaprojektowane śmigło działające na podobnej zasadzie do śmigła helikoptera, umieszczone w obudowie robota. Dzięki odpowiednio dużej prędkości obrotowej, pod specjalnie wyprofilowanym i umieszczonym w tunelu śmigłem wytwarza się podciśnienie, a nad nim powstaje nadciśnienie dociskające robota do powierzchni.

**h) Elektromagnes**

Aby trzymać się metalowych powierzchni, można wykorzystać elektromagnesy. W odpowiednim momencie robot musi dostarczyć prąd do odpowiedniego elektromagnesu, po

**Tab. 1.** Zalety i wady układów ruchu w płaszczyźnie pionowej

**Tab. 1.** Advantages and disadvantages of the systems movement in the vertical plane

	Układ kołowy	Układ gąsienicowy	Układ krokowy
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> <li>– szybkość</li> <li>– łatwość sterowania</li> <li>– możliwość stosowania systemu ssącego</li> <li>– duża trwałość</li> <li>– możliwość zwiększenia przyczepności i sterowności dzięki zastosowaniu bardziej złożonych konstrukcji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– duża powierzchnia styku</li> <li>– szybkość</li> <li>– łatwość sterowania</li> <li>– możliwość stosowania większości metod przyczepienia do pionu</li> <li>– łatwa zmiana płaszczyzny ruchu z poziomego na pionowy</li> <li>– ułatwione ciasne manewrowanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– możliwość stosowania przysawek ciśnieniowych</li> <li>– łatwa zmiana płaszczyzny ruchu z poziomego na pionowy</li> <li>– możliwość obrotu w miejscu i wykonywania ciasnych manewrów</li> </ul>
Wady	<ul style="list-style-type: none"> <li>– brak możliwości stosowania przysawek ciśnieniowych</li> <li>– problem przy przejściu z płaszczyzny poziomej do pionowej</li> <li>– problem z obrotem w miejscu i ciasnymi manewrami</li> <li>– mała powierzchnia styku</li> <li>– w przypadku przewrotki większość robotów zostanie unieruchomionych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– w przypadku przewrotki większość robotów zostanie unieruchomiona</li> <li>– konieczność stosowania gumowych nakładek</li> <li>– mała trwałość (rozerwanie lub spadnięcie gąsienicy grozi upadkiem)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– powolność</li> <li>– skomplikowane sterowanie</li> <li>– problem przy stosowaniu układu ssącego</li> <li>– skomplikowana budowa</li> </ul>



czym w celu odłączenia odłączyć elektromagnes. Możliwe to jest jedynie przy poruszaniu się po powierzchniach ferromagnetycznych (żelazo).

#### i) Przyleganie elektrostatyczne

Robot generuje między podłożem ściany a sobą wyładowania elektrostatyczne. Zasada działania jest podobna do uchwytów elektrostatycznych wykorzystywanych do sklejania wafli krzemowych lub podobnych technik wykorzystujących przemysłowe pobieranie delikatnych materiałów. Używa małej ilości energii. Wykazuje zdolność do przylegania do podłoża pokrytego w znacznym stopniu kurzem lub nierównościami.

#### j) Kleje specjalne

Aby robot mógł poruszać się po pionowych powierzchniach wykorzystuje się specjalne lepkie taśmy lub nanosi na gąsienice roztopiony klej. Niestety klej pozostawia za sobą ślady, a taśma ulega zużyciu.

## 4. Zalety i wady układów ruchu w zastosowaniu do robota poruszającego się po powierzchni pionowej

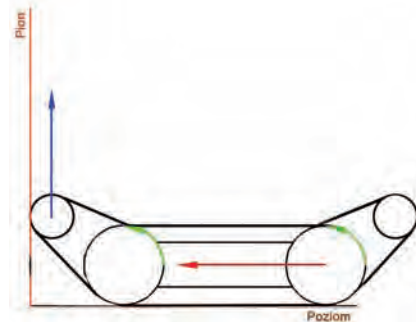
Wszystkie omówione układy ruchu odpowiednio zrealizowane umożliwiają poruszanie się po płaszczyźnie poziomej. Przeanalizowaliśmy ich sposób działania w takim środowisku oraz przedstawiliśmy wady i zalety. Nasz robot powinien jednak radzić sobie tak w poziomie, jak i w pionie, dlatego należy zweryfikować mocne i słabe strony poszczególnych rozwiązań gdy postanowimy postawić naszą maszynę „na głowie”. Zestawiliśmy główne zalety i wady poszczególnych układów (tab. 1). To w jakim stopniu będą one prawdziwe zależy od pomysłu i konkretnego rozwiązania w danym układzie.

## 5. Koncepcja układu lokomocji robota poruszającego się po powierzchniach pionowych

Po analizie podstawowych rozwiązań układów lokomocji oraz ich interakcji z systemami umożliwiającymi przyłączenie robota do powierzchni pionowej zdecydowaliśmy się na połączenie układu gąsienicowego ze śmigłem wyprofilowanym jak łopaty w śmigłowcach. Taka relacja pozwala otrzymać stosunkowo prostą i lekką konstrukcję o łatwym sterowaniu, która potrafi przyczepić się do każdej płaskiej powierzchni. Żaden z układów nie zakłóca pracy drugiego. Gąsienice charakteryzują się dużą powierzchnią styku z podłożem, co poprawia jego sprawność i przyczepność oraz umożliwia szybkie manewry. To rozwiązanie ma jednak również wady. Śmigło pobiera dużą ilość energii, przez co czas działania robota będzie ograniczony. Spadnięcie gąsienicy oznacza upadek, a ciąg wytwarzany przez śmigło ogranicza robota do lekkiej konstrukcji. Oczywiście te niedogodności można obejść, stosując bardziej złożone układy.

Nasz robot w założeniach ma realizować samoczynną zmianę płaszczyzny ruchu z poziomego na pionowy. Wykonanie tego zadania będzie odbywać się dzięki wystającym poza obrys konstrukcji gąsienicom pokrytym materiałem

o dużym współczynniku tarcia, które na końcach będą nachylone pod kątem około 45° umożliwiającym wjazd na ścianę. W tym czasie, dzięki wbudowanemu czujnikowi kąta położenia względem poziomu, załączone zostanie śmigło wytwarzające ciąg, który dociągnie i utrzyma robota w pozycji pionowej. Czujnik zbliżeniowy wyhamuje robota przed tą operacją, aby ten nie odbił się od ściany, a powoli na nią wjechał. Aby robot podczas tego manewru nie przewrócił się na „plecy”, wystające poza obrys, pochylone gąsienice zastosujemy również z tyłu. Schematycznie zostało to przedstawione na rys. 3



Rys. 3. Zmiana płaszczyzny

Fig. 3. Plane change

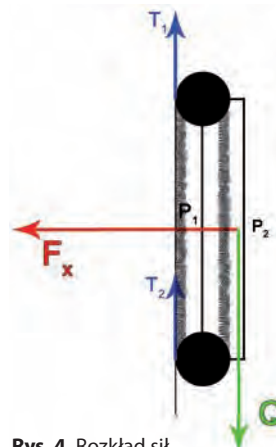
Śmigło zapewniające mobilność robota w dowolnej płaszczyźnie ruchu będzie zaadoptowanym z rozwiązań modelarskich śmigłem samolotowym sprzężonym z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego (BLDC). Odpowiednie śmigło napędzane tym silnikiem wytworzy ciąg umożliwiający utrzymanie konstrukcji przy ścianie. Śmigło będzie przymocowane bezpośrednio do wału silnika, lub za pomocą piasty, aby uniknąć skrzywienia wirnika podczas pracy. Dodatkowo zespół umieścimy w tunelu dostosowanym do szerokości śmigła, zapewniającym lepsze podciśnienie wytwarzane między robotem a powierzchnią ściany, której odległość od podstawy powinna być niewielka.

Rozkład sił podczas postoju robota przedstawiony jest na rys. 4. Na zespół w takim momencie działają trzy siły. Jest to siła ciężkości  $Q$ , siła  $F$  wynikająca z podciśnienia wytwarzanego przez śmigło pod powierzchnią robota:

$$F = A \cdot p$$

oraz zależna od niej (jak również od współczynnika  $\mu$ ) siła tarcia  $T$ :

$$T = \mu \cdot F$$



Rys. 4. Rozkład sił

Fig. 4. Force decomposition

Bilans wyżej wymienionych sił musi dążyć do zera, aby robot nie zsuwał się z powierzchni, po której się porusza (dla wartości ujemnych), oraz nie obciążał zbyt mocno układu napędowego (dla wartości dodatnich), co prowadziłoby do większego zużycia energii lub zniszczenia napędu. Układ powinien być wyposażony w parzystą liczbę wirników obracających się w przeciwnych kierunkach,

**Tab. 2.** Współczynniki tarcia dla wybranych materiałów [2]**Tab. 2.** Friction coefficients for chosen materials [2]

Rodzaj stykających się powierzchni	Współczynnik tarcia statycznego	Współczynnik tarcia dynamicznego
stal–stal	0,15	0,09–0,03
stal–drewno	0,5	0,5–0,2
stal–lód	0,02–0,03	0,02
guma–beton (suchy)	1	0,7
drewno–drewno	0,4–0,65	0,2–0,5
drewno–metal	0,5–0,6	0,3–0,6
drewno–skóra	0,4–0,6	0,3–0,5
metal–metal	0,15–0,30	0,15–0,20
metal–skóra	0,3–0,5	0,25

aby powstające momenty żyroskopowe znosiły się i nie wpływały na pracę robota. Płaska konstrukcja powinna jak najściślej przylegać do ściany, aby możliwe było wytworzenie ciśnienia  $P_1$  dużo mniejszego od  $P_2$ , oraz zapewniać jak najmniejszą odległość środka masy od ściany (punktu przyłożenia siły tarcia), tak by zredukować moment obrotowy odrywający robota od ściany. Ponadto współczynnik tarcia dla różnych powierzchni przyjmuje szeroką rozpiętość wartości w zależności od rodzaju stykających się powierzchni, w naszym przypadku ma on szczególne znaczenie. Przykładowe zestawienie tego parametru znajduje się w tab. 2.

Jak widać, guma ma duży współczynnik tarcia, który w zależności od powierzchni styku i rodzaju gumy waha się od 1 do 4 (statyczne) oraz 0,5 do 1 (dynamiczne), dlatego zastosujemy gumowe nakładki na gąsienice lub inne o podobnych właściwościach. Podciśnieniem  $P_1$  będziemy sterować za pomocą zmiany prędkości obrotowej silnika. Aby silnik można było uruchomić, należy podłączyć go do regulatora, który do swojego działania wymaga generatora impulsów prostokątnych. Częstotliwość impulsów na wejściu generatora jest proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika. Na potrzeby przeprowadzanych testów skonstruowaliśmy prosty generator impulsów prostokątnych y układem NE555. Generator impulsów wyposażony został w potencjometr, dzięki któremu regulujemy prędkość obrotową silnika. W przyszłości robot

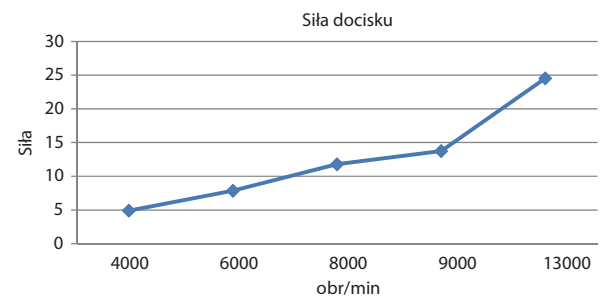
**Rys. 5.** Zdjęcia z testów**Fig. 5.** Photos from the tests

będzie musiał automatycznie operować śmigłem i innymi elementami, dlatego wyposażony zostanie w mikrokontroler. Wytwarzany ciąg jest zależny od średnicy śmigła i prędkości obrotowej, która zależna jest od mocy zastosowanego silnika. Istotny wpływ na wartość podciśnienia ma również skok łopaty. Dzięki większemu skokowi łopaty ilość wyrzucanego za nie powietrza (skutkujące zwiększeniem podciśnienia pod robotem) jest większa.

Układy nie są idealne, dlatego przy obliczeniach należy uwzględnić sprawność zarówno silnika, jak również śmigła. Niestety, w rozwiązaniach modelarskich takie dane nie są podane, a właściwe wartości zależą od konkretnego produktu, dlatego należy samemu przetestować jego działanie.

Po wykonaniu pomiarów na zakupionym przez nas układzie silnika i śmigła 8"×8" (gdzie pierwsza cyfra to średnica, a druga skok łopaty), otrzymaliśmy charakterystykę, której przebieg przedstawia rys. 6.

Po wykonaniu pomiarów na zakupionym przez nas układzie silnika i śmigła 8"×8" (gdzie pierwsza cyfra to średnica, a druga skok łopaty), otrzymaliśmy charakterystykę, której przebieg przedstawia rys. 6.

**Rys. 6.** Charakterystyka śmigła**Fig. 6.** Propeller characteristics

Na tej podstawie do obliczeń możemy przyjąć siłę docisku równą 24,5 N przy zasilaniu 24 V. Szacowana masa naszego robota wynosić będzie 2 kg. Przeprowadziliśmy przybliżone wyliczenia sił działających na układ w różnych wariantach. Z obliczeń wynika, że robot powinien poruszać się w dowolnym ułożeniu. Przykładowo, dla ułożenia jak na rys. 4 i przy użyciu jednego śmigła masa robota mogłaby mieć wartość do 2,4 kg.

Zastosowane do testów śmigło okazało się niskiej jakości (wygina się przy wysokich prędkościach), dlatego osiągi rzeczywiste przy wykorzystaniu śmigła wyższej klasy (większej sztywności) oraz większym rozmiarze i skoku powinny być lepsze. W przypadku przekroczenia zakładanej masy robota możliwe jest zwiększenie liczby śmigieł, ich rozmiaru bądź zastosowanie wspomagającego napędu tunelowego, co przekłada się na znaczny wzrost siły dociskającej przy małym przyroście masy.

Dzięki gąsienicom robot może obracać się w miejscu. Kierowanie robotem odbywać się będzie poprzez wyhamowanie lub zmianę kierunku obrotu jednego z silników odpowiadającego za pracę jednej gąsienicy, a pozostawienie drugiego silnika obracającego drugą gąsienicę do przodu. Robot skrecać będzie w stronę gąsienicy kręcącej się do tyłu.

## 6. Podsumowanie

Każdy z układów lokomocji robota, jak i sposób przymocowania go do płaszczyzny pionowej ma swoje zalety i wady. Nie ma złotego środka, a wybór konkretnego sposobu jest poddyktowany zadaniem, jakie ma realizować dany robot. Oczywiście kryterium są również dostępne środki finansowe. Nie warto inwestować w kosztownego projekt, jeżeli efekty końcowe nie będą wykorzystywane w praktyce. Nasz projekt zakłada skonstruowanie robota potrafiącego utrzymać się i poruszać w płaszczyźnie pionowej, jak również swobodnie, bez udziału człowieka, zmienić tę płaszczyznę na poziomą. Zadaniem robota jest przemieszczanie się po powierzchni szklanej, betonowej itp., a więc w miarę gładkiej i równej. Stosowanie skomplikowanego układu krokowego jest niepotrzebne. Układ kołowy ma małą powierzchnię styku z podłożem, przez co trudno będzie mu się utrzymać w pionie, a dość skomplikowany układ kierowniczy ma sporą masę i potrzebuje powierzchni, którą w naszym projekcie zajmuje śmigło. Wybrany przez nas układ jest stosunkowo prosty i zapewnia duże tarcie, czyli jest najbardziej optymalny do stawianych przed nim zadań. Śmigło natomiast doskonale współpracuje z zawieszeniem na gaśienicach utrzymującym stałą odległość od ściany. Użycie przysawek ogranicza robota do powierzchni gładkich, przyleganie elektrostatyczne, magnes, haczyki, przysawki z elastomeru czy kleje specjalne znacznie ograniczyłyby stosowalność robota. Materiał przypominający skórę gekona jest kosztowny i trudno dostępny. Teoretyczne podchodzenie do zagadnienia pracy śmigła i sił przy tym powstających jest możliwe, jednak efekty takich obliczeń są mało dokładne i mogą okazać się mylne. Niezbędne jest przeprowadzenie badań i empiryczne wyznaczenie wartości działających sił. Na tej podstawie wybierzemy najodpowiedniejszą konstrukcję robota, określimy jego maksymalne obciążenie i możliwości zastosowania.

## Bibliografia

1. Internetowa encyklopedia Wikipedia.
2. Zielińska T.: *Maszyny kroczące. Podstawy, projektowanie, sterowanie i wzorce biologiczne*. PWN 203.
3. Współczynniki tarcia dla wybranych materiałów: [www.iwiedza.net/wiedza/058.html](http://www.iwiedza.net/wiedza/058.html)
4. Do rys. 2.:
  - 1) [www.air-com.info](http://www.air-com.info)
  - 2) [www.asimo.pl/modele/stickybot.php](http://www.asimo.pl/modele/stickybot.php)
  - 3) <http://img5.imageshack.us/img5/1167/geko.png>  
[www.terrarium.com.pl/forum/viewtopic.php?t=355439&sid=2489c6351a04a949c4154bb6a-ecede05](http://www.terrarium.com.pl/forum/viewtopic.php?t=355439&sid=2489c6351a04a949c4154bb6a-ecede05)
  - 4) [http://pl.wikipedia.org/wiki/Pompa\\_odśrodkowa](http://pl.wikipedia.org/wiki/Pompa_odśrodkowa)
  - 5) [www.botjunkie.com/2009/04/08/spinybot-climbs-with-tiny-claws/](http://www.botjunkie.com/2009/04/08/spinybot-climbs-with-tiny-claws/)
  - 6) [www.pomocieszkolne.com/files/100/elektromagnes\\_1.jpg](http://www.pomocieszkolne.com/files/100/elektromagnes_1.jpg)
  - 7) [http://konport.pl/new/pl/tasmy\\_i\\_kleje\\_przemyslowe/kleje/kleje\\_termotopliwe.html](http://konport.pl/new/pl/tasmy_i_kleje_przemyslowe/kleje/kleje_termotopliwe.html)
  - 8) <http://fizjlk.fic.uni.lodz.pl/rut/phystoys/rozd-2.pdf>
  - 9) [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vortex\\_ring\\_helicopter.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vortex_ring_helicopter.jpg)
  - 10) <http://elektrostatyka.com/strony/co-jest-elektryczność-statyczna> ■

## Transportation systems as applied to the robot moving along vertical surfaces

**Abstract:** The work is devoted to reflection about a robot able to move in the vertical and horizontal surfaces with the possibility of self-motion plane change. Paper presents the most commonly used transportation systems, their advantages and disadvantages. It presents and briefly describes the possible solutions to help navigate the robot on the vertical planes. We discuss the pros and cons of systems during the vertical movement, then presents an analysis of specific solutions, problems and advantages of this approach.

**Keywords:** BLDC Motor, transportation system, motion system, robot walking on wall, changing the plane of motion

### Jarosław Rychlica

Urodzony 27.09.1989 r. w Biskupcu. Mieszka i studiuje w Olsztynie. Student trzeciego roku mechatroniki na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim. Członek Koła Naukowego Mechatroniki. Interesuje się mechatroniką przemysłową oraz robotyką.

e-mail: [jarek.r@poczta.onet.pl](mailto:jarek.r@poczta.onet.pl)



### Łukasz Zieleniewicz

Urodzony 19.01.1989 r. w Mrągowie. Mieszka i studiuje w Olsztynie. Student trzeciego roku mechatroniki na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim. Członek Koła Naukowego Mechatroniki. Interesuje się robotyką, informatyką oraz motoryzacją. Lubi podróżować oraz jeździć na nartach.



### Łukasz Chrobot

Urodzony w Płocku. Mieszka i studiuje w Olsztynie. Student trzeciego roku mechatroniki na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim. Aktywny członek Koła Naukowego Mechatroniki. Zainteresowania: informatyka, automatyka, programowanie strukturalne.



### Jan Gorczyca

Mieszkaniec Olsztyna. Student studiów drugiego stopnia na kierunku Edukacja Techniczno-Informatyczna. Jednocześnie studiuje na trzecim roku mechatroniki na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim. Członek Koła Naukowego Mechatroniki.



### mgr Maciej Mikulski

Asystent w Katedrze Mechatroniki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Urodzony 14.12.1982 r. w Działdowie. Obecnie mieszka i pracuje w Olsztynie. W Katedrze odpowiedzialny za „Pracownię badań silników spalinowych”, opiekun roku na kierunku mechatronika, opiekun Koła Naukowego Mechatroniki. Zainteresowania naukowe: modelowanie matematyczne procesów spalania w silnikach dwupaliwowych, nowoczesne systemy mechatroniczne jednostek pływających, modelowanie procesów fizycznych w aspekcie bezpieczeństwa żegluga.

e-mail: [mechatronika@uwm.edu.pl](mailto:mechatronika@uwm.edu.pl)

