

ANDRZEJ FRĄCZEK

## Inżynierski projekt mobilnego robota wyposażonego w wykrywacz metalu służącego do detekcji min

*W artykule przedstawiono projekt mobilnego robota gaśnicowego wykonanego w ramach pracy inżynierskiej, mogącego poruszać się w zróżnicowanym terenie. Jego zadaniem jest wykrywanie metalowych przedmiotów, co jest realizowane za pomocą wykrywacza metalu umieszczonego na manipulatorze o trzech stopniach swobody. Całość sterowana jest z poziomu telefonu za pomocą dedykowanej aplikacji.*

*Całość prac projektowych została podzielona na trzy segmenty. Dla części mechanicznych (platforma mobilna, manipulator) sformułowano model matematyczny obiektu, na podstawie którego dokonano obliczeń i doboru napędów oraz innych niezbędnych komponentów. Dla wykrywacza przedstawiono opis badań prowadzonych pod kątem doboru cewki układu sensorycznego. W części związanej ze sterowaniem robota została zaprezentowana aplikacja oraz proces testowania za pomocą stanowiska wykonanego na płycie prototypowej.*

*Na zakończenie przedstawiono złożenie całego robota wraz z podsumowaniem wykonanych prac, wnioskami i kierunkami dalszych badań.*

*Słowa kluczowe: robot mobilny, manipulator, wykrywacz metalu, aplikacja bluetooth*

### 1. WPROWADZENIE

W XX wieku zarówno na terenie Europy, jak i Bliskiego Wschodu miało miejsce szereg konfliktów zbrojnych: I i II wojna światowa, wojna w Afganistanie, wojna na terenie byłej Jugosławii. Spowodowało to wzrost użycia min, pistoletów, samolotów i wielu innych przedmiotów z arsenału armii.

Jednym z najbardziej nieprzewidywalnych zagrożeń stanowią miny. Według Hemapali [1] nawet 100 000 000 min przeciwpiechotnych zostało rozmieszczonych na całym świecie przez różne jednostki wojskowe i organizacje terrorystyczne. Tanie w produkcji, niewidoczne dla wroga mogą wyrządzić przerażające straty.

Niestety, zazwyczaj po zakończeniu konfliktu zwaśnione strony opuszczają tereny działań, pozostawiając po sobie wiele niebezpiecznych materiałów wybuchowych. Stanowią one zagrożenie dla ludności cywilnej. Sam proces oczyszczania takich terenów jest niezwykle czasochłonny. Wymagane jest użycie wykwalifikowanego personelu wyposażonego w nowoczesny sprzęt, a sama operacja oczyszczania gruntu jest czynnością zagrażającą życiu i zdrowiu operatora. W sa-

mej Polsce oddziały Marynarki Wojennej przeprowadzają około 300 interwencji na rok, których celem jest neutralizacja niewybuchów stanowiących zagrożenie dla ludności cywilnej [2].

Jednocześnie wiele osób dostrzegło możliwość wykorzystania zdalnie sterowanych maszyn w celu neutralizacji różnorodnych materiałów wybuchowych. Roboty są rozwiązaniem pewniejszym i bezpieczniejszym dla operatora. Tego typu konstrukcje stanowią obecnie podstawę do działania saperów we współczesnych konfliktach zbrojnych.

Wiele z takich konstrukcji powstało we współpracy z przemysłem zbrojeniowym. Można je podzielić na dwa różne segmenty. Pierwszy z nich to pojazdy stanowiące wsparcie dla wojsk lądowych (przykładem takiej konstrukcji jest robot MATILDA używany przez armię USA w trakcie konfliktu w Iraku [3]). Druga kategoria to eksperymentalne konstrukcje przeznaczone do działania w ciężkim środowisku, np. wodnym. Opis takich projektów (ARIEL czy BUR-001) został zaprezentowany w pracy M. Jankiewicza [4].

Jednocześnie badacze z różnych uniwersytetów opracowują własne konstrukcje koncentrujące się na

samym procesie detekcji min tak, aby oczyścić zamknięte tereny i umożliwić tam powrót ludności cywilnej. Tego typu konstrukcje to robot kroczący w konfiguracji hexapod DYLEMA [5], pięciokoświaty manipulator zamontowany na zdalnie sterowanym czterokołowym pojeździe terenowym GRYPHON [6] czy robot zasilany przez energię słoneczną [7].

Jednak takie konstrukcje są niezwykle drogie w produkcji oraz obsłudze. Dostęp do nich mają tylko jednostki wojska krajów wysoko rozwiniętych. Problem niewybuchów/min dotyczy niestety całego globu (często w krajach dopiero podnoszących się z zapaści, które nie stać na drogie urządzenia). Inżynierowie z takich krajów (np. Pakistanu) próbują rozwiązać ten problem, tworząc takie roboty jak MARWA [8].

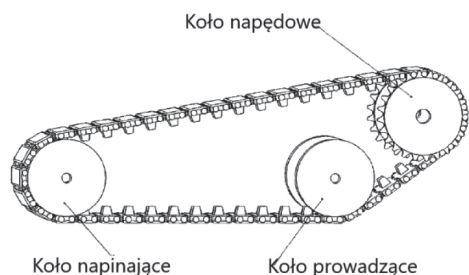
Właśnie te aspekty stanowiły motywację do stworzenia projektu taniego robota, który mógłby pomóc zidentyfikować i oczyścić niebezpieczne obszary. Takie rozwiązanie byłoby lepiej osiągalne dla biedniejszych krajów i mogłoby zapobiec niepotrzebnym szkodom.

## 2. CZĘŚĆ MECHANICZNA

Cele, które zostały postawione przed wyborem sposobu poruszania się robota, były następujące:

- możliwość poruszania się zarówno w terenie (trawa, piasek), jak i części zurbanizowanej (kostka brukowa, asfalt),
- łatwość w pokonywaniu nierówności terenu,
- jak najmniejszy nacisk na strukturę podłoża (aby zapobiec deformacji terenu).

Na ich podstawie po przeanalizowaniu klasycznych rozwiązań obecnych na rynku wybrany został układ gąsienicowy przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Elementy układu gąsienicowego [9]

Największą zaletą tego typu napędu (w stosunku do zawieszenia kołowego) to możliwość działania w trudnym terenie (błoto, śnieg). Powierzchnia styku gąsienicy jest o wiele większa niż w zawieszeniu kołowym, dzięki temu tylko na niezwykle sypkim gruncie istnieje możliwość wpadnięcia w poślizg [10].

Dodatkowo napężenie wywierane na podłoże jest bardzo niskie. Nowoczesny czołg M1A2 Abrams o masie bliskiej 72 ton wyposażony w taki układ ma podobny nacisk jak człowiek stojący na jednej nodze (82 kPa) [9].

Dodatkowo przeprowadzono dyskusję dotyczącą typu zawieszenia robota. Robot w założeniu musi operować na kamienistym terenie, przez co mogą wystąpić niekorzystne wibracje. Z uwagi na charakter pracy robota (preferowana jest mała prędkość ruchu w celu zwiększenia dokładności poszukiwań) zastosowane zostanie rozwiązanie z kołami sztywnymi.

Według Sandina [9] zjawisko wibracji przy małych prędkościach zanika, więc można bez problemu zastosować ten wariant w tym projekcie.

Kolejnym krokiem było sformułowanie modelu matematycznego. Niezbędne było dokonanie podziału na dwie części:

- kinematyka i dynamika układu gąsienicowego,
- mechanika pojazdu.

Każda z nich ma inny, ale równie istotny wpływ na poruszanie się całej platformy mobilnej.

Na początku rozważań model gąsienicy możemy traktować jako giętką, nierozciągliwą taśmę. Stanowi ona obwód wyznaczony przez nieodkształcalne podłoże, koło napędowe i napinające oraz koła nośne. Każdy punkt obwodu gąsienicy uczestniczy w dwóch ruchach:

- unoszenia względem drogi, po której porusza się pojazd,
- względnego w odniesieniu do pojazdu.

Pierwszym czynnikiem mającym wpływ na platformę jest poślizg. Zachodzi on w momencie, kiedy prędkość pojazdu różni się od prędkości względnej. Wielkość tę opisuje współczynnik poślizgu:

$$s = 1 - \frac{v}{v_R} \quad (1)$$

gdzie:

- $v$  – prędkość pojazdu [m/s],
- $v_R$  – prędkość punktu na obwodzie gąsienicy [m/s].

Na potrzeby kolejnych rozważań zmieniono model gąsienicy na oddzielne człony, które wpływają na jej ruch. Korzystając z rozważań przeprowadzonych w Burdzińskim [11], wprowadzone zostaje pojęcie prędkości średniej. Spowodowane jest to faktem, że prędkość kątowa koła napędowego jest zmienna. Wpływa na to fakt, że pojazd gąsienicowy to układ dynamiczny działający na niejednorodnym podłożu.

Dodatkowo wpływ ma skończona długość podziałki gaśienicy. Wzór na prędkość średnią jest następujący:

$$v_{sr} = t_g n_k z (1-s) \quad (2)$$

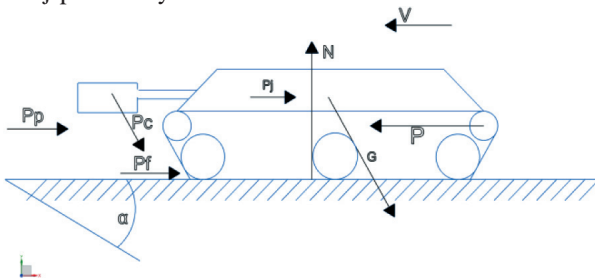
gdzie:

- $t_g$  – podziałka gaśienicy [m],
- $z$  – liczba zębów koła napędowego,
- $n_k$  – liczba obrotów koła napędowego [rad/s].

Ostatnią rzeczą, którą trzeba uwzględnić jest sprawność gaśienicy. W trakcie względnego ruchu dwóch sąsiadujących ogniw występują straty z powodu tarcia. Zależą one od naciągu gaśienicy, sił odśrodkowych oraz momentu napędowego. Wzór jest bardzo skomplikowany stosuje się zamiennie, uproszczony wzór [11]:

$$\eta_g = 0,95 - 0,005 v_{sr} \quad (3)$$

Kolejnym krokiem było stworzenie modelu ruchu całej platformy.



Rys. 2. Siły działające na pojazd

Na rysunku 2 zostały przedstawione siły działające na pojazd poruszający się po wzniesieniu o kącie w stosunku do pionu  $\alpha$ . Są to:

- $P$  – siła napędowa [N],
- $N$  – siła reakcji podłoża [N],
- $P_p$  – siła oporu powietrza [N],
- $P_f$  – siła oporu toczenia [N],
- $P_c$  – siła ciężkości cewki [N],
- $G$  – siła ciężkości robota [N],
- $P_j$  – siła bezwładności [N].

Omówione zostaną poniższe siły:

- 1) Siła ciężkości pojazdu – przyłożona jest w środku ciężkości. Obejmuje ona masy zarówno samego korpusu, jak i manipulatora z cewką.
- 2) Siła oporów toczenia – dla pojazdów gaśienicowych opis tej siły jest złożony, dlatego według Burdzińskiego [11] można opisać ją równaniem:

$$P_f = f(G + P_C) \cos \alpha \quad (4)$$

gdzie  $f$  – współczynnik oporów toczenia.

- 3) Siła reakcji podłoża – w robocie to wypadkowa siła oddziaływania gruntu na dolną taśmę gaśienicy.

Jej wartość można wyznaczyć z równania:

$$N = (G + P_C) \cos \alpha \quad (5)$$

- 4) Siły oporów powietrza – wynikają z geometrii pojazdu i mogą zostać wyrażone wzorem:

$$P_p = \rho c A v^2 \quad (6)$$

gdzie:

- $\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $c$  – współczynnik oporu pojazdu,
- $A$  – powierzchnia czołowa pojazdu [ $\text{m}^2$ ].

- 5) Siła bezwładności pojazdu – występuje dla nieinercyjnego układu odniesienia i jest przyłożona w środku ciężkości pojazdu, a jej wzór to:

$$P_j = (G + P_C) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

- 6) Siła napędowa – powstaje w wyniku działania układu napędowego. Dla ruchu nieustalonego wzór ten ma postać:

$$P = \frac{M_k}{r_k} \eta_g - \frac{M_j}{r_k} \quad (8)$$

gdzie:

- $M_k$  – moment z koła napędowego [Nm],
- $r_k$  – promień koła napędowego [m],
- $M_j$  – moment styczny sił bezwładności wszystkich obracających się części gaśienicy w odniesieniu do osi koła napędowego [Nm].

Ostatecznie po uporządkowaniu i wprowadzeniu założeń można otrzymać dwie formuły:

- 1) Dla ruchu prostoliniowego jednostajnego można zaniedbać człony zawierające  $dv/dt$ . Dodatkowo dla założonych prędkości poruszania można zaniedbać wpływ oporu powietrza i równanie ma postać:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f(G + P_C) \cos \alpha + (G + P_C) \sin \alpha \quad (9)$$

- 2) Dla poruszania się po płaskim terenie kąt  $\alpha$  równa się 0, więc:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f(G + P_C) \cos \alpha \quad (10)$$

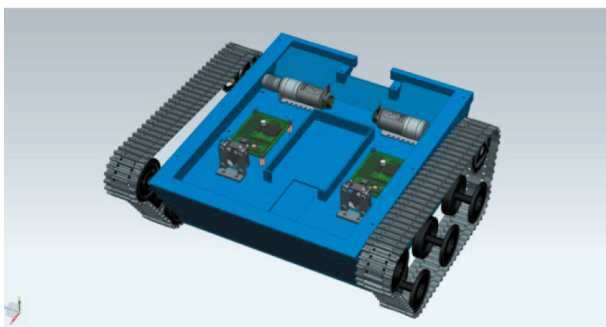
Po wyprowadzeniu równań wykonane zostaną obliczenia dla minimalnego momentu, który trzeba dostarczyć do układu napędowego. Założenia to poruszanie się z prędkością 0,4 m/s na wzniesieniu o kącie 10 stopni (dla normalnych dróg odpowiada to procentowemu wzniesieniu 17,63%). Dla porównania największe wzniesienia w Alpach mają 32% [11].

Dodatkowo niezbędne jest jeszcze przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa. W literaturze dla pojazdów o stałym obciążeniu wynosi on 1,15 [11]. Jednak z racji tego, że jest to pionierska konstrukcja, przyjęto współczynnik bezpieczeństwa  $n = 1,4$ . Otrzymany ostatecznie moment wynosi:

$$M_k = 0,56 \text{ Nm} \quad (11)$$

Dla tego momentu dobrano:

- zestaw układu gąsienicowego,
- silniki marki Pololu,
- sterowniki przeznaczone do silników,
- wentylatory chłodzące.



Rys. 3. Model CAD platformy mobilnej

Aby zweryfikować, czy wszystkie elementy platformy poprawnie zmieszczą się w korpusie robota, wykonany został model zawieszenia (rys. 3) wraz z komponentami, które zostały już dobrane. Korpus jest przygotowany do wykonania w technologii druku 3D.

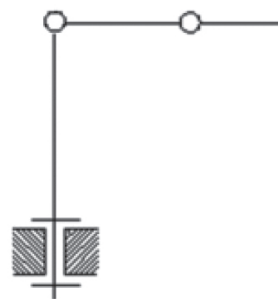
Kolejnym krokiem była konstrukcja manipulatora. Powinna ona spełniać następujące wymagania:

- możliwość prowadzenia pomiarów na ściśle określonej wysokości nad podłożem,
- wykonywanie operacji „przemiatania” (prowadzenie detekcji na większym obszarze dla jednej pozycji robota).

W projekcie zostanie użyty manipulator o trzech pierwszych stopniach swobody (rys. 4), gdyż są one wystarczające do spełnienia wyżej wymienionych założeń projektowych. Wynika to z faktu, że dotyczą przemieszczania cewki w przestrzeni, a nie pozycjonowania jej względem podłoża.

Po zakończeniu analizy najczęściej spotykanych struktur kinematycznych zostanie użyta struktura RRR (obrotowe antropomorficzne ramię manipulatora), gdyż cechuje się:

- uniwersalnym zastosowaniem,
- dużą przestrzenią roboczą,
- niezawodnością.



Rys. 4. Obrotowe antropomorficzne ramię manipulatora [12]

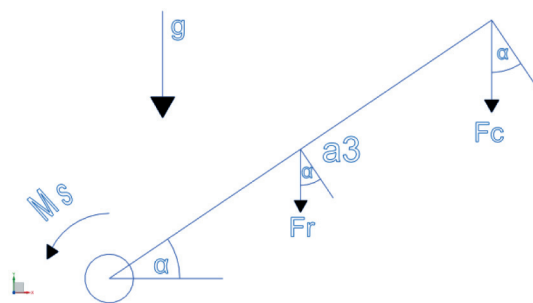
Ma ona też wady takie, jak np. duży koszt wysokiej powtarzalności manipulatora, jednak w przypadku operacji przeszukiwania gruntu jest to niepotrzebne i wygenerowałyby dodatkowe koszty.

W tej części, korzystając z notacji Denavita-Hartenberga, otrzymano macierz przekształcenia jednorodnego:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 & s_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & a_2 s_2 + a_3 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Na jej podstawie oraz złożonych punktów, które ma osiągnąć manipulator, dobrano długości członów manipulatora. Wykorzystano do tego metodę opracowaną w pracy Siciliano, Sciavicco, Villani i Oriolo [13].

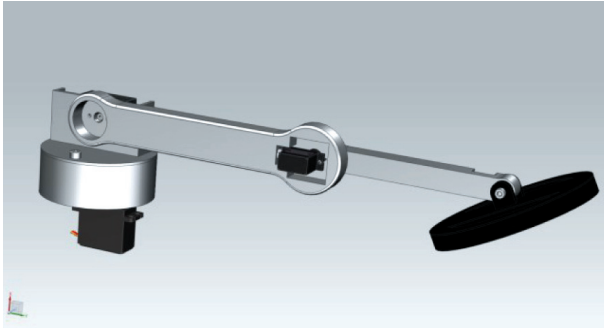
Kolejnym krokiem był dobór napędów. Dla każdego członu osobno formułowano model matematyczny i na jego podstawie obliczano moment potrzebny do poruszenia danym członem oraz serwomechanizm (rys. 5).



Rys. 5. Siły działające na trzeci człon

Celem ostatniej części było wykonanie modelu CAD poszczególnych członów oraz złożenia ich wraz z serwomechanizmami. Dla tak przygotowanego manipulatora wykonano analizę metodą elementów skończonych. Złożenie całego elementu pokazano na rysunku 6.





Rys. 6. Model CAD manipulatora

Materiał, z którego zostaną wykonane elementy składowe manipulatora, to tworzywo ABS. Zastosowanie tworzywa sztucznego, którego można użyć jako filamentu w drukarce 3D typu FDM ma szereg zalet:

- w wypadku użycia metalu jako materiału konstrukcyjnego układ pomiarowy mający wykrywać metal w otoczeniu zostaje zakłócony – jest to kluczowa cecha,
- tworzywo ABS używane w drukarkach odznacza się dużą wytrzymałością na obciążenia oraz odpornością na warunki atmosferyczne.

### 3. CZĘŚĆ ELEKTRONICZNA

Układem, który stosuje się głównie w czasie poszukiwań metalu w ziemi, to wykrywacz metalu. Układ ten działa, korzystając z prawa Faradaya oraz uogólnionego prawa Ampera.

Według Hallidaya, Walkera i Resnicka [14], prawo Faradaya sformułowane jest w następujący sposób: „Pole elektryczne jest indukowane zmiennym w czasie strumieniem pola magnetycznego”.

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

gdzie:

$\frac{d\Phi_B}{dt}$  – zmiana strumienia indukcji magnetycznej [Wb] w czasie,

$E$  – siła elektromotoryczna [V].

Według Hallidaya, Walkera i Resnicka [14] uogólnione prawo Ampera sformułowane jest w następujący sposób: „Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienny w czasie strumień pola elektrycznego”.

$$\int \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I \quad (14)$$

gdzie:

$\int \vec{B} d\vec{l}$  – całka indukcji magnetycznej do zamkniętej krzywej [T],

$\mu_0$  – przenikalność elektryczna próżni [H/m],

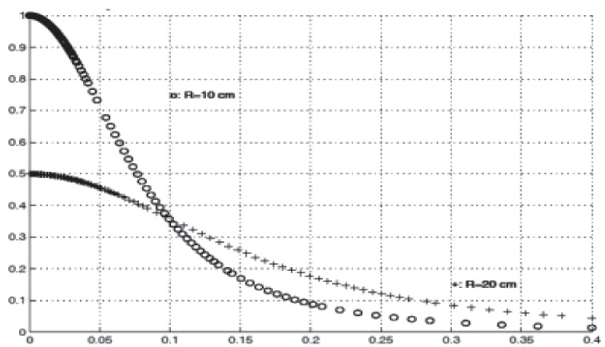
$\epsilon_0$  – przenikalność magnetyczna próżni [F/m],

$\frac{d\Phi_E}{dt}$  – zmiana strumienia indukcji elektrycznej w czasie [Vm],

$I$  – natężenie prądu [A].

Wykrywacz za pomocą układu elektrycznego wytwarza pole magnetyczne. Swoje zadanie sensor zaczyna spełniać, gdy znajdzie się w obszarze, gdzie fale elektromagnetyczne zaczynają oddziaływać na materiał przewodzący znajdujący się np. w ziemi. W obiekcie wtedy indukuje się siła elektromotoryczna (prawo Faradaya). Zaczynają się tworzyć tzw. prądy wirowe, które są powodem powstania wyindukowanego pola magnetycznego (uogólnione prawo Ampera). Nowe pole magnetyczne zaczyna oddziaływać na cewkę. Zaczyna płynąć prąd, który jest rejestrowany przez układ pomiarowy wykrywacza.

Właściwości drugiego pola są zależne od wielu parametrów, m.in.: geometrii samego przedmiotu (odległość od wykrywacza, orientacja względem niego), właściwości materiałowych (kształt, wielkość, przewodność, przenikalność magnetycznej). Wielkość i kształt samej cewki też mają bardzo duże znaczenie, co jest pokazane na wykresie z rysunku 7.



Rys. 7. Zależność pola magnetycznego od odległości od dwóch różnych cewek [15]

Znormalizowany wykres przedstawiający zależność pola magnetycznego od odległości  $d$  [m] od cewek dla dwóch różnych ich rozmiarów (10 cm oraz 20 cm) przedstawiono na rysunku 7. Normalizacja przeprowadzona została dla cewki mniejszej na odległości  $d = 0$  [15].

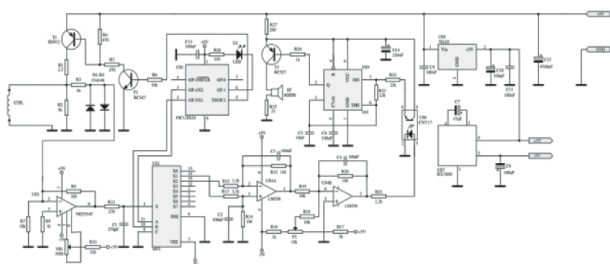
Na rynku znajduje się szereg rodzajów wykrywaczy. Po przeanalizowaniu typów wykrywaczy wybrano typ PI (*Pulse Induction*).

Detektory te działają na zasadzie regularnego generowania impulsów elektrycznych wysyłanych do sondy. W momencie zaniku impulsu elektrycznego

następuje utrata pola magnetycznego na sondzie. Czas, z jakim to się dzieje, zależy od tego, czy znajduje się w nim metal. Jeżeli takowy jest, to pole zanika dużo wolniej, co można wykryć. Jego zalety to:

- brak wrażliwości na mineralizację gleby,
- prosta konstrukcja (wystarczy jedna sonda).

Samodzielne wykonanie wykrywacza jest trudne. Liczba zmiennych wpływających na działanie jest duża, dlatego koszt gotowych wykrywaczy zaczyna się od 300 zł (65 euro). Dodatkowo jednym z założeń było przeprowadzenie pomiarów i wykonanie różnych cewek. Z ich pomocą znaleziono optymalne wartości takich parametrów jak średnica oraz ilość zwojów. Wykorzystano zestaw do samodzielnego montażu firmy Jabel. Układ ten nazywa się J-297 (rys. 8).



Rys. 8. Płytki wykrywacza Jabel J-297

Jak wspomniano wcześniej, sprawność wykrywacza jest zależna od parametrów cewki. Z tego powodu zaplanowano wykonanie pomiarów. Celem pomiarów było zoptymalizowanie wymiarów cewki (które zależą od dwóch parametrów):

- liczba zwojów cewki,
- średnica cewki.

Celem było zachowanie jak najmniejszej wagi przy uzyskaniu jak najlepszych wyników w wykrywaniu metalowych elementów.

Z powodu wybranych docelowych wymiarów robota wybrano dwie średnice cewek użytych do optymalizacji: 10 cm oraz 12 cm. Wykonano dla nich odpowiednie „pady” (wydruk 3D składający się z podstawy oraz szeregu pionowych kolumn służący do ułatwienia procesu nawijania cewki), na które nawinięto cewki o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

**Tabela 1**  
**Sporządzone cewki**

Numer cewki	Średnica cewki [cm]	Liczba zwojów	Waga [g]
1	10	50	46,9
2	10	70	65,6
3	10	95	89,0
4	12	40	45,0
5	12	60	67,5

Wybrano dwa obiekty pomiarowe:

- moneta 1 lev bułgarski (średnica 24,5 mm, grubość 1,9 mm),
- puszka metalowa 0,33 l znanego producenta napoju cola (wysokość 116 mm, szerokość 66 mm, głębokość 66 mm).

Na potrzeby pomiarów wykonano stanowisko pomiarowe (rys. 9). Przedmiot znajduje się na wydrukowanej platformie poruszanej w górę i dół za pomocą sznurka, który za pomocą bloczka tworzy maszynę prostą. W momencie, gdy wykrywacz wykryje monetę, można utwierdzić sznurek, przeplatając go kilkukrotnie przez element drukowany znajdujący się na dolnej półce stołu. Umożliwia to wyeliminowanie błędu spowodowanego drżeniem ręki.



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe dla monety

Skrótowny plan wykonywania pomiarów:

- 1) włączenie wykrywacza,
- 2) kalibracja wykrywacza,
- 3) wykonanie pięciu pomiarów,
- 4) wyłączenie wykrywacza.

Dla każdego obiektu ta procedura została powtórzona trzy razy. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2, a opis symboli to:

- wartość średnia:  $\mu$  [cm],
- odchylenie standardowe:  $\sigma$  [cm].

Korzystając ze wszystkich zrobionych pomiarów, wybrano ostatecznie cewkę o średnicy 12 cm mającą 60 zwojów.

Ważną kwestią jest także sposób komunikacji operatora z robotem. Przyjęto następujące założenia projektowe:

- prostota obsługi,
- brak autonomiczności robota (użytkownik kontroluje ruch robota).

**Tabela 2**  
Zestawienie wyników pomiarów

Cewka	$\mu$ puszki [cm]	$\sigma$ puszki [cm]	$\mu$ monety [cm]	$\sigma$ monety [cm]
1	25,91	2,29	11,33	0,15
2	25,69	0,93	12,14	0,3
3	26,52	2,9	13,66	0,5854
4	26,13	1,64	14,12	0,42
5	29,73	1,19	60,0	0,27



Rys. 10. Przykładowy histogram z pomiarów

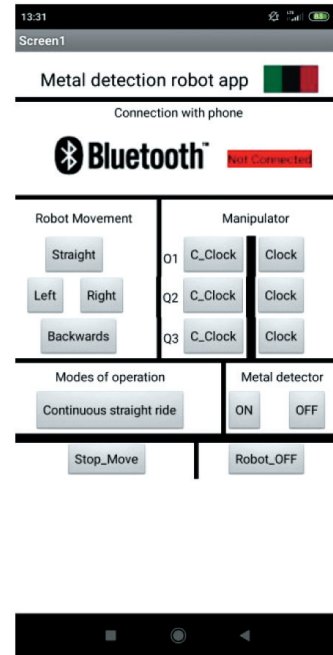
Z uwagi na powyższe założenia został wybrany standard bluetooth. BLE (*Bluetooth Low Energy*) zapewnia bardzo niskie zużycie energii i zasięg nawet do 20 m.

Dodatkowo istnieje możliwość wykonania specjalnej aplikacji na telefon z systemem Android, którą można na bieżąco rozwijać.

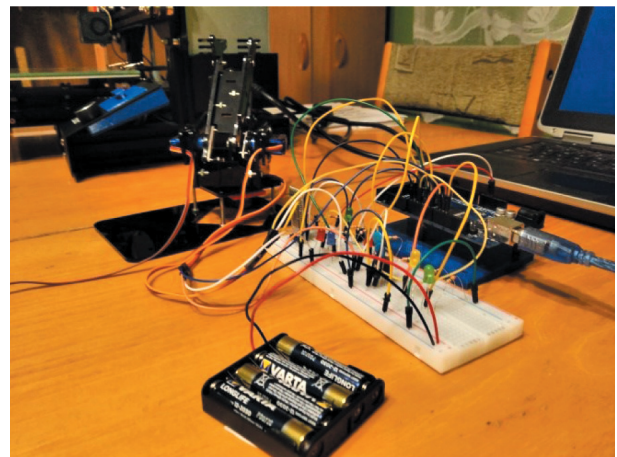
Aplikacja napisana została na stronie [appinventor.mit.edu](http://appinventor.mit.edu). Strona ta pozwala na pisanie aplikacji na Androida bez konieczności stosowania konwencjonalnych języków programowania. W tym środowisku wykonuje się aplikacje, stosując bloki odpowiadające konkretnym akcjom (np. wysłaniu sygnału jednobitowego za pomocą bluetooth).

Po stworzeniu wszystkich niezbędnych funkcji aplikacja została skompilowana i zapisana jako plik o rozszerzeniu .app. Plik ten jest obsługiwany przez większość popularnych obecnie marek telefonów. Wygląd aplikacji po zainstalowaniu w telefonie przedstawiono na rysunku 11.

Kod stworzony do działania mikrokontrolera napisany w środowisku Arduino IDE. Skorzystano z biblioteki Servo. Sama konstrukcja programu oparta jest na komendach *switch...case* w celu zapewnienia czytelności i przejrzystości kodu. Na potrzeby testowania działania kodu wykonane zostało stanowisko badawcze za pomocą płytki prototypowej oraz manipulatora (rys. 12).



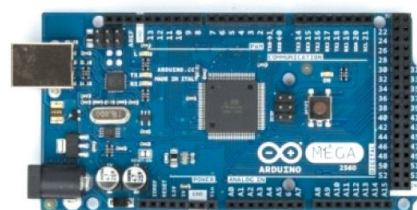
Rys. 11. Zrzut ekranu aplikacji z prywatnego telefonu



Rys. 12. Stanowisko testowe aplikacji mobilnej

Sygnalizowanie poszczególnych funkcji dla platformy mobilnej oraz wykrywacza zostało zrealizowane za pomocą diod LED. Pozwala to w tani i prosty sposób przetestować działanie komunikacji tych funkcji.

Na samym końcu dokonano doboru płytki sterującej. Do sterowania całym układem użyty zostanie mikrokontroler Arduino Mega (rys. 13).



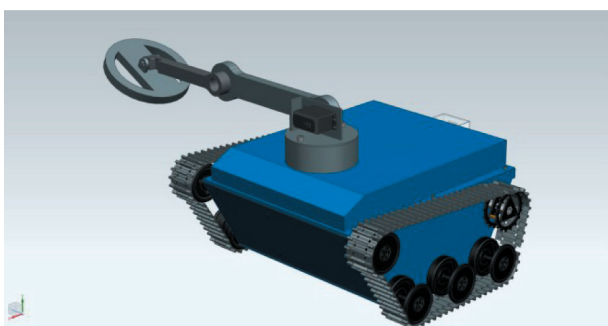
Rys. 13. Arduino Mega



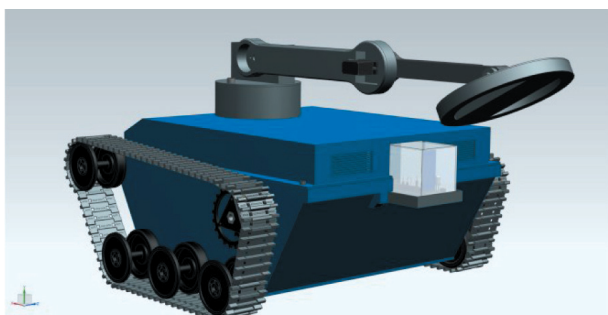
Jest to układ powszechnie dostępny na rynku, oferujący przystępną cenę oraz dużą liczbę portów do podłączenia elementów peryferyjnych.

#### 4. ZŁOŻENIE ROBOTA

Po wyselekcjonowaniu wszystkich ważnych komponentów elektrycznych ostatnim krokiem było dobranie zasilania oraz przetwornic, które zapewniłyby ciągłe dostarczanie odpowiedniego napięcia na silniki i serwo mechanizmy. Wybrano ogniwo Li-Pol, gdyż jest ono powszechnie stosowane w robotyce. Przetwornic natomiast wybrane zostały one z katalogu firmy Pololu.



Rys. 14. Model CAD robota – widok na przód z boku



Rys. 15. Model CAD robota – widok na tył z boku

Po dobraniu wszystkich elementów cały robot został złożony, co i zostało przedstawione na powyższych renderach (rys. 14 i 15). Cały robot waży około 3,5 kg.

#### 5. PODSUMOWANIE

Cel, jaki został postawiony przed rozpoczęciem realizacji pracy, czyli projekt robota, został zrealizowany. Dzięki tak obszernemu zakresowi prac możliwe było zastosowanie wiedzy nabytej na studiach I stopnia. Szczegółowe zagadnienia dotyczyły mechaniki,

doboru napędów, kinematyki manipulatorów, badań wykrywacza metali oraz programowania.

Jednocześnie jest to projekt. Pełna jego weryfikacja możliwa jest dopiero w momencie budowy samego robota. Eksploatacja i testy prototypu mogą wygenerować sytuację, których nie da się przewidzieć na etapie tworzenia założeń oraz projektowania. Nie oznacza to jednak, że faza projektowania może być zaniedbana. Podczas niej można uniknąć kosztownych pomyłek, które zostałyby odkryte dopiero na dalszych etapach projektu i skutkowałyby koniecznością zmian konstrukcji, a także pociągałyby za sobą dodatkowe koszty.

Dodatkowo po zapoznaniu się z rozwiązaniami obecnymi na rynku warto zastanowić się, czy dobrze byłoby wzbogacić projekt robota o dodatkowe funkcje. W większości projektów na końcu manipulatora znajduje się chwytak, który pozwala pozycjonować układ sensoryczny względem krzywizny gruntu.

Kolejną ważną rzeczą byłoby przeprowadzenie testów wykrywacza dla obiektów znajdujących się w glebie. Układ Jabel spełnił swoje założenia dla testów w powietrzu, jednak jego osiągi znacząco mogą się pogorszyć, gdy poszukiwania będą prowadzone w ziemi, więc warto sprawdzić jego działanie w tym obszarze. Dodatkowo w części elektronicznej można rozważyć dodanie kamer/czujników ultradźwiękowych co zwiększy autonomiczność robota.

W części związanej z software'em testy prowadzone na płytce prototypowej pozwoliły ustabilizować komunikację z modułem bluetooth, jednak niemożliwe było odwzorowanie w 100% działania robota. Jedną z ważniejszych rzeczy to enkoder, który jest umieszczony w silnikach odpowiedzialnych za sterowanie platformą mobilną. Jest on niezwykle cennym elementem, gdyż pozwala na precyzyjne sterowanie robotem oraz poprawę płynności działania samego układu (można zastosować regulator). Na płytce prototypowej nie było możliwe przetestowanie tego, więc do czasu ewentualnych testów na prototypie robota niezbędne jest uwzględnienie enkoderów w algorytmie sterowania robotem.

#### 6. WNIOSKI

Zamierzony cel w postaci projektu robota eksploacyjnego został osiągnięty. W ramach przyszłych prac potrzebny jest jego dalszy rozwój i praktyczna realizacja, aby otrzymać w pełni działającego robota.



## Literatura

- [1] Hempala U.M.: *Robots for Humanitarian Demining*. InTech, 2017.
- [2] Chmieliński M.: *Bezpieczeństwo neutralizacji niewypałów i niewybuchów amunicji artyleryjskiej w strefie przybrzeżnej*. Autobusy, 2017, 6: 99–106.
- [3] Munkeby S., Jones D., Bugg G., Smith K.: *Applications for the MATLIDA Robotic Platform*. Proceedings SPIE 2002, 4715, 206–2013.
- [4] Jankiewicz M.: *Przeciwwminowe roboty – pojazdy kroczące*. Biuletyn WAT 2017, 56: 273–286.
- [5] Gonzalez de Santos P., Garcia E., Estemera J., Armada M.A.: *DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location*. International Journal of Systems Science 2005: 545–558.
- [6] Fukushima F. E., Freese M., Matsuzawa T., Aibara T., Hirose S.: *Humanitarian demining robot Gryphon current status and an objective evaluation*. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems 2017: 735–753.
- [7] Albert F.Y.C., Mason C.H.S., Kiing C. K. J., Ee K.S., Chan K.W.: *Remotely operated solar-powered mobile metal detector robot*. Procedia Computer Science 2014, 42: 232–239.
- [8] Abubakr M., Syed M.A., Talha M., Adnan M., Syed A.A., Mhequb H., Ali A., Mian A.M.: *Marwa: A Rough Terrain Landmine Detection Robot For Low Budget*. Proceedings of the 43<sup>rd</sup> International Symposium on Robotics, London 2012.
- [9] Sandin P.: *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. McGraw Hill, New York 2003.
- [10] Rybak P.: *Tracked or wheeled chassis*. Journal of KONES Powertrain and Transport 2007, 3: 527–536.
- [11] Burdziński Z.: *Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
- [12] Buratowski T.: *Teoria robotyki*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2012.
- [13] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo.: *Robotics Modeling, Planning and Control*. Springer, London 2010.
- [14] Halliday D., Walker J., Resnick R.: *Podstawy fizyki. Tom 3*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [15] Bruschini C.: *A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining*. Rozprawa doktorska, Vrije Universiteit Brussel, Brussels 2002.

inż. ANDRZEJ FRĄCZEK  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
anfracze@student.agh.edu.pl