

Projekt Systemy Mikroprocesorowe
MazeBot
Robot unikający przeszkód z regulacją napędu silników prądu stałego

Maciej Ziaja, Bartosz Staszulonek

11 stycznia 2019

Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Abstrakt	2
1.2	Cel i zakres projektu	2
2	Organizacja projektu	2
2.1	Harmonogram	2
2.2	Budżet	3
3	Budowa prototypu, analiza problemów	3
4	Projekt układu elektronicznego	3
4.1	Działanie i uzasadnienie doboru elementów elektronicznych	3
4.1.1	Mikroprocesor ATmega32u4	3
4.1.2	Silniki prądu stałego	4
4.1.3	Sterownik silników prądu stałego - mostek H	5
4.1.4	Stabilizator napięcia L7805CV	5
4.1.5	Czujnik ultradźwiękowy	5
4.1.6	Serwomechanizm	6
4.1.7	Odbiornik podczerwieni TSOP4836	6
4.1.8	Elementy pasywne	6
4.2	Schemat układu elektronicznego	7
4.3	Projekt układu drukowanego	7
4.3.1	Parametry techniczne układu drukowanego	7
4.3.2	Rozmieszczenie elementów na powierzchni układu drukowanego	8
5	Projekt podwozia robota	8
6	Synteza układów regulacji	8
6.1	Regulator synchronizacji prędkości silników	8
6.2	Kaskadowy regulator skrętu platformy	9
6.3	Identyfikacja obiektu regulacji	9
6.4	Strojenie regulatorów	9
7	Implementacja programistyczna	9
8	Wykorzystane technologie	9
9	Perspektywy rozwoju, podsumowanie	9

1 Wstęp

1.1 Abstrakt

Projekt polegał na budowie mobilnego robota, który unika przeszkód. Konstrukcja porusza się na dwóch kołach, wykrywa przeszkody za pomocą czujnika ultradźwiękowego zamocowanego na wieży serwomechanizmu. Platforma robota napędzana jest za pomocą pary silników prądu stałego, których kąt obrotu jest odczytywany przez robota za pomocą czujników szczelinowych. W celu zwiększenia precyzji działania układu zbudowano układy regulacji prędkości silników. Wykonano dwa typy układ regulacji, synchronizujący prędkość obrotu obu silników w celu zachowania kierunku jazdy na wprost oraz kaskadowy układ regulacji skrętu platformy robota. Układ regulacji skrętu robota przypomina zasadą działania prosty serwomechanizm. Przedstawiono metodę identyfikacji i strojenia regulatorów. Na potrzeby projektu wykonano także schemat układu elektronicznego i zrealizowano go w postaci obwodu drukowanego PCB. Zaprojektowano także podwozie robota i wydrukowano je w technologii 3D.

1.2 Cel i zakres projektu

Projekt obejmował budowę platformy bazującej na mikroprocesorze z serii ATmega32, obsługującym peryferia:

- czujnika ultradźwiękowego wykrywającego przeszkody,
- wieży serwomechanizmu, na której zamontowany jest czujnik i która kieruje go w różne strony,
- silników prądu stałego stanowiących napęd platformy
- czujników szczelinowych odczytujących kąt obrotu osi kół platformy,
- odbiornika podczerwieni pozwalającego na wyłączenie robota pilotem jeśli ten się oddali.

Współpraca tych komponentów pozwala robotowi na unikanie przeszkód. Działanie robota powinno polegać na jeździe przed siebie do czasu napotkania przeszkody. W momencie wykrycia przeszkody robot powinien się zatrzymać, a następnie zbadać czy w jego otoczeniu znajduje się niezagrodzona droga i skierować się na nią. Prototyp wykonano z użyciem układu Arduino Leonardo. Przeprowadzono testy współpracy komponentów i wyciągnięto wnioski dotyczące budowy finalnej konstrukcji. Na podstawie testów określono parametry elementów finalnej konstrukcji. Działanie prototypu prowadziło do następujących decyzji projektowych, które podyktowały dalszy tok projektu i jego zakres:

- w celu wydajnego wykorzystania przestrzeni na platformie zdecydowano się na wykonanie własnego układu elektronicznego i obwodu drukowanego,
- zaprojektowano własne podwozie dopasowane do używanych peryferiów,
- wykonano układy regulacji jazdy na wprost oraz skręcania platformy.

2 Organizacja projektu

2.1 Harmonogram

Projekt należało zrealizować w przeciągu 4 miesięcy. Proces jego wykonania składał się z dwóch części: testów komponentów wraz z budową prototypu oraz konstrukcji finalnego układu na podstawie wniosków wyciągniętych z testów konstrukcji prototypowej. Tabela 2.1 przedstawia ramowy rozkład pracy w czasie.

Termin	Zakres pracy
01.10.2018 - 20.10.2018	Zebranie komponentów układu, ustalenie zakresu prac
20.10.2018 - 01.11.2018	Test komponentów i peryferiów z użyciem Arduino Leonardo
01.11.2018 - 14.11.2018	Budowa prototypu, programowanie głównej logiki programu
14.11.2018 - 01.12.2018	Projekty obwodu drukowanego PCB i podwozia
01.12.2018 - 20.12.2018	Synteza i oprogramowanie układów regulacji
20.12.2018 - 01.01.2019	Złożenie układu finalnego
01.01.2019 - 20.01.2019	Strojenie układów regulacji, budowa dokumentacji

Tabela 1: Harmonogram pracy

2.2 Budżet

3 Budowa prototypu, analiza problemów

Realizację projektu zaczęto od zgromadzenia peryferiów koniecznych do realizacji robota. W pierwszej fazie prototypowania komponenty testowano osobno używając Arduino Leonardo. Zapoznano się z ich praktycznymi możliwościami i działaniem dostępnych bibliotek.

Następnie połączono wszystkie komponenty jednocześnie i przeprowadzono ich jednoczesne testy oraz zmierzono zasilanie używając multimetru i zasilacza regulowanego. Testy pokazały, że układ przy zasilaniu 7.3 V pobiera prąd do 0.3 A , co dostarcza nam informacji potrzebnych do doboru baterii dla robota.

Elementy prototypowe umieszczono na platformie testowej i oceniono działanie konstrukcji. Okazało się, że działanie robota jest możliwe, ale sterowanie silnikami w torze otwartym nie było wystarczająco precyzyjne aby unikać przeszkód. Przy symetrycznym wysterowaniu silników robot nie poruszał się w kierunku prostym, różnice w działaniu poszczególnych silników są zbyt duże by pracowały one symetrycznie co jest wymagane by platforma jechała na wprost. Skręcanie platformy o zadany kąt również okazało się nieprecyzyjne, obroty o na przykład 90 stopni w prawo były mało powtarzalne i obarczone dużym błędem. Zdecydowano się na syntezę układów regulacji, aby wyeliminować te problemy.

Testy platformy prototypowej pokazały także, że złożoność układu jest zbyt duża aby budować go na płytce stykowej/prototypowej. Dodatkowo serwomechanizm, który jest bardzo wrażliwy na zakłócenia zasilania, działał źle gdy był połączony przez wiele kabli, które razem tworzyły dużą rezystancję. Obserwacje te skłoniły nas do zaprojektowania własnego obwodu drukowanego, który mieściłby wszystkie potrzebne komponenty elektroniczne na małej przestrzeni. Konstrukcja mechaniczna platformy prototypowej okazała się mało solidna i nie była dostosowana do używanych przez nas modułów elektronicznych. W celu zwiększenia porządku i wytrzymałości układu zdecydowano się na projekt własnego podwozia robota.

4 Projekt układu elektronicznego

4.1 Działanie i uzasadnienie doboru elementów elektronicznych

4.1.1 Mikroprocesor ATmega32u4

Centralnym elementem robota jest mikroprocesor AVR o architekturze RISC. Ośmiobitowe mikroprocesory ATmega są popularnym wyborem przy konstrukcji układów wbudowanych w przemysł i urządzeniach elektronicznych o niedużym stopniu wymaganej wydajności. Ich zaletą jest duża powszechność oraz fakt, że na procesorach z tej rodziny bazuje popularna platforma Arduino, w ramach której dostępny jest szeroki zakres bibliotek programistycznych do obsługi peryferiów. Przy wyborze konkretnego modelu mikroprocesora kierowaliśmy się następującymi kryteriami:

- obsługa czterech przerwań zewnętrznych:
 1. pochodzących z enkodera lewego koła,
 2. pochodzących z przerwań enkodera prawego koła,
 3. pochodzących z czujnika ultradźwiękowego,
 4. pochodzących z odbiornika podczerwieni,
- obsługa trzech wyjść PWM, za pomocą liczników w celu:
 1. sterowania prędkością lewego silnika prądu stałego,
 2. sterowania prędkością prawego silnika prądu stałego,
 3. sterowania położeniem serwomechanizmu, na którym zamontowany jest czujnik ultradźwiękowy,
- możliwość użycia sumarycznie dwunastu wejść wyjść cyfrowych do komunikacji z peryferiami,
- pożądana jest wbudowana obsługa komunikacji szeregowej za pomocą interfejsu USB w celu łatwego debugowania układu i zdjęcia pomiarów dynamiki układu przy identyfikacji obiektu regulacji i strojeniu regulatorów
- powyższe wymagania powinny być spełnione przy użyciu bootloadera i bibliotek Arduino.

Powyższe wymagania spełnia mikroprocesor ATmega32u4 firmy Atmel. Jest to procesor na którym bazuje układ Arduino Leonardo, który wykorzystano przy konstrukcji prototypu. Z użyciem bibliotek Arduino ATmega32u4 pozwala na używanie do pięciu przerwań zewnętrznych oraz siedmiu kanałów generujących sygnały PWM. Istotne jest, że kanały PWM są obsługiwane przez cztery oddzielne liczniki. Biblioteki Arduino (szczególnie obsługi serwomechanizmu) wchodzi łatwo w konflikty i korzystają z liczników w sposób uniemożliwiający ich współdzielenie przy generowaniu sygnałów PWM. Dlatego przy doborze mikroprocesora i wyborze jego wyprowadzeń starano się, aby serwomechanizm był obsługiwany przez oddzielny licznik. Pin sterujący serwem nie powinien generować sygnałów z użyciem tego samego licznika co inne kanały PWM, aby uniknąć konfliktów bibliotek Arduino. Wybrany model mikroprocesora jest dostępny tylko w obudowach powierzchniowych QFP (*Quad Flat Package*), przy wyborze tej jednostki należy pamiętać, że wymaga ona umiejętności precyzyjnego lutowania. Procesor może pracować przy zasilaniu 5 V, jest to dla nas dogodne ponieważ reszta naszych peryferiów ma takie same napięcie zasilania.

4.1.2 Silniki prądu stałego

Ze względu na ograniczenia budżetowe zdecydowano się na jedne z najtańszych dostępnych silników, wyprodukowane przez firmę Dagu. Silniki prądu stałego oferują największe momenty siły przy małych obrotach, nadają się dobrze do napędzania i przyspieszania platform robotów, oferują możliwość płynnego sterowania. Ich wadą jest fakt, że bez dodatkowego układu czujników nie można określić ich kąta obrotu. Ze względu na obecność komutatora i szczotek silniki prądu stałego zużywają się w czasie pracy. Parametry wybranych przez nas silników są następujące:

- maksymalne napięcie zasilania: 6 V,
- moment obrotowy: $0,8 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $0,78 \text{ Nm}$,
- obroty silnika bez obciążenia: $(90 \pm 10) \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
- pobór prądu silnika bez obciążenia: 190 mA (*max.* 250 mA),

- pobór prądu silnika przy zatrzymanym wale: 1 A.

Do silników przymocowano koła o parametrach:

- średnicy: 65 mm,
- szerokości: 30 mm.

4.1.3 Sterownik silników prądu stałego - mostek H

Najbardziej popularnym sposobem sterowania silnikami prądu stałego jest użycie mostka H. Jest to układ składający się z czterech tranzystorów polowych, których dreny i źródła są odpowiednio połączone z sterowanym silnikiem. Para tranzystorów połączona z tą samą szczotką silnika ma złączone bramki, ale przeciwny stan otwarcia. Złączone bramki są wyprowadzone z układu i stanowią wejścia sterowania. W zależności od tego na które z wejść podamy stan wysoki przez jeden z tranzystorów z każdej pary będzie płynął prąd, powodując obroty silnika w odpowiednim kierunku. Układem elektronicznym, który zawiera w sobie dwa mostki H, co pozwala na sterowanie parą silników, jest L298N. Dodatkowo układ posiada dodatkowe tranzystory do sterowania prędkością silników za pomocą sygnału PWM, który stopniowo otwiera i domyka tranzystor polowy przepuszczający sygnały wejściowe. Parametry sterownika są następujące:

- maksymalne napięcie zasilania silników: 45 V,
- napięcie części logicznej: 4,5 V – 7 V,
- maksymalny prąd zasilający silnik: 2 A.

Sterownik dostępny jest w obudowie przewlekanej Multiwatt15. Porównując parametry mostka H z silnikami możemy stwierdzić, że jest on wystarczający do ich wysterowania.

4.1.4 Stabilizator napięcia L7805CV

Wszystkie układy logiczne zasilane są napięciem 5 V, ale silniki zasilane są napięciem 7,3 V. Wynika stąd, że najlepiej zastosować baterię siedmiowoltową, a zasilanie do części logicznej dostarczać poprzez regulator napięcia. Najbardziej popularnym regulatorem jest układ 7805. W wersji CV jego parametry są następujące:

- maksymalne napięcie wejściowe: 35 V,
- napięcie wyjściowe: 5 V (z dokładnością 2%),
- maksymalny prąd wyjściowy: 1.5 A.

Stabilizator jest dostępny w różnych obudowach, przewlekanych i powierzchniowych, ze względu na łatwość montażu, dostępność i możliwość zamontowania radiatora wybraliśmy model w obudowie przewlekanej TO-220. Po porównaniu parametrów stabilizatora z parametrami komponentów, które zasili można stwierdzić, że jest on wystarczający.

4.1.5 Czujnik ultradźwiękowy

Najbardziej popularnym i łatwo dostępnym czujnikiem odległości jest czujnik ultradźwiękowy HC-SR04. Czujniki ultradźwiękowe mierzą odległość na podstawie czasu, który jest potrzebny fali ultradźwiękowej na dotarcie do przeszkody i powrót do czujnika po jej odbiciu. Pomiar czujnikiem rozpoczyna się od podania na wejście TRIG stanu wysokiego przez 10 μs. Powoduje to wygenerowanie przez czujnik ciągu ośmiu sygnałów ultradźwiękowych o częstotliwości 40 kHz. Po odbiciu sygnału od przeszkody i jego powrocie do czujnika odległość można obliczyć według wzoru 1, gdzie:

- $dist$ to odległość mierzona,
- Tim_h to czas trwania stanu wysokiego,
- v_s to prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w powietrzu, typowo $340 \frac{m}{s}$.

$$dist = \frac{Tim_h \cdot v_s}{2} \quad (1)$$

Model czujnika HC-SR04 charakteryzuje się następującymi parametrami:

- napięcie zasilania: $5 V$,
- średni pobór prądu: $15 mA$,
- zakres pomiarowy: od $2 cm$ do $200 cm$,
- częstotliwość pracy: $40 kHz$,
- wymiary: $45 \times 20 \times 15 mm$.

Zasilanie czujnika i zakres jego pracy są odpowiednie dla projektu. Przeszkody które chcemy wykrywać będą znajdowały się w odległości parunastu centymetrów od robota. Należy mieć na uwadze, że czujniki ultradźwiękowe najlepiej wykrywają duże przeszkody. Dodatkowo istotne jest, że pomiar czujnika ultradźwiękowego trwa w czasie, przebycie odpowiedniej drogi przez falę ultradźwiękową nie jest natychmiastowe. Kwestia ta zostanie wzięta pod uwagę w czasie tworzenia oprogramowania.

4.1.6 Serwomechanizm

Aby umożliwić robotowi kierowanie czujnika odległości w różnych kierunkach, ten zamieszczono na wieży serwomechanizmu. Ponieważ wymagamy aby czujnik mógł być skierowany w lewo, prawo oraz na wprost wystarczające jest serwo 180 stopni. Waga czujnika ultradźwiękowego jest znikoma, dlatego serwomechanizm można wybrać kierując się jak najniższą ceną.

4.1.7 Odbiornik podczerwieni TSOP4836

Robota wyposażono w odbiornik podczerwieni ułatwiający jego zatrzymanie. W celu łatwej współpracy z domowymi pilotami na podczerwień należało wybrać odbiornik wspierający popularne formaty: NEC Code, Toshiba Micom Format, Sharp Code, RC5 Code, RC6 Code, R-2000 Code...

Wybraliśmy odbiornik TSOP4836 pracujący z falami o częstotliwości $36 kHz$. Zgodnie z dokumentacją odbiornika należy go zabezpieczyć kondensatorem filtrującym i rezystorem. Parametry odbiornika są następujące:

- napięcie zasilania: od $4,5 V$ do $5,5 V$,
- średni pobór prądu: $1,5 mA$.

4.1.8 Elementy pasywne

Użyte komponenty elektroniczne wymagają użycia kondensatorów filtrujących, zastosowano kondensatory o pojemnościach podanych w dokumentacjach filtrowanych elementów. Kondensatory ceramiczne są umieszczone w obudowach przewlekanych, starano się dobrać kondensatory elektrolityczne w obudowach powierzchniowych, aby zredukować miejsce, którą zajmują. Spis wszystkich elementów układu, w tym elementów pasywnych znajduje się w sekcji 4.2.

4.2 Schemat układu elektronicznego

Na rysunku przedstawiono utworzony schemat układu elektronicznego. Zastosowano przycisk, który zwiera pin reset z ziemią, jeżeli przycisk jest przytrzymany dostatecznie długo zresetowany zostanie układ. Aby podczas resetu nie doszło do zwarcia zasilania dodano rezystor R1. Układ resetu znajduje się w polu B2 schematu. Źródłem taktowania mikroprocesora jest zewnętrzny rezonator kwarcowy 16 MHz. Do jego poprawnego działania konieczne są odpowiednie kondensatory. Do osiągnięcia zamierzonego taktowania użyto kondensatorów o pojemności 22 pF. Mikroprocesor zasilono napięciem 5 V, zasilanie filtrowane jest kondensatorami 100 nF, zasilanie portu USB filtrowane jest kondensatorami 1 μF. W polu A2 schematu umieszczono diody sygnalizacyjne. Dioda PWR sygnalizuje obecność napięcia na wyjściu stabilizatora. Diody TX, RX związane są z transmisją szeregową. Diody podłączono tak że są aktywne kiedy wyjścia procesora są w trybie niskim. Dzięki temu diody świecą kiedy transmisja szeregową nie ma miejsca i sygnalizują tym samym jego poprawne działanie. Jest to wygodne ponieważ dioda PWR mówi tylko o obecności zasilania, ale nie informuje użytkownika o poprawnym uruchomieniu układu. Każda z diod podłączona jest przez odpowiedni rezystor.

W polu C1 znajduje się port USB w wersji MICRO. Linie portu szeregowego zabezpieczono dławikiem ferrytowym, oraz rezystorami. Do programowania mikroprocesora zastosowano złącze ICSP sześciopinowe, znajdujące się w polu D1 schematu.

W polu A5 schematu znajduje się mostek H L298. Do jego wyjść silnikowych dodano diody prostownicze, łączące go z baterią zasilającą skierowane przeciwnie do polaryzacji baterii. Na cewkach silników w czasie jego pracy gromadzi się energia w postaci pola magnetycznego. Po zatrzymaniu silników i hamowaniu platformy energia to wróci do układu w postaci płynącego prądu. Dzięki obecności diod układ mostka jest zabezpieczony przez tymi prądami, popłyną one przez diody do baterii, co więcej ze względu na polaryzację energia odzyskiwana z silników będzie ładować baterię, tworząc prosty układ aktywnego hamowania. W sekcji IO PORTS znajdują się złącza peryferiów układu. Komponenty z fabrycznymi wyprowadzeniami przez goldpiny, połączono tak samo od strony układu. Silniki i zasilanie są złączone przez konektory ARC.

4.3 Projekt układu drukowanego

4.3.1 Parametry techniczne układu drukowanego

Ze względu na ograniczoną przestrzeń na powierzchni platformy robota zdecydowano się na wykonanie własnego obwodu drukowanego w technologii dwustronnej, z metalizowanymi otworami i solder maską. W celu zachowania zgodności z procesem technologicznym producenta płytek przyjęto następujące ustawienia DRC (*Design rules check*):

- grubość laminatu wraz ze ścieżkami: 1.5 mm,
- grubość ścieżek: 0.035 mm,
- odległości między padami, przelotkami (*via*) oraz ścieżkami: 6 mil,
- odległości ścieżek od krawędzi płytki: 40 mil,
- minimalna odległość otworów: 6 mil,
- minimalna szerokość ścieżki: 6 mil,
- minimalna średnica otworu: 0,35 mm,
- szerokość termoizolacji padów od wylewek (ułatwia lutowanie): 10 mil.

Przy tworzeniu płytki zastosowano technikę wylewki masy, tworzenia dużych płaszczyzn masy, zamiast prowadzenia poszczególnych ścieżek. Ułatwia to rozmieszczenie połączeń i zmniejsza

rezystancję ścieżek masy. Zastosowano elementy zawierające ołów jako bardziej wytrzymałe i łatwiejsze w lutowaniu. W amatorskim lutowaniu nie używa się temperatur przy których nie wydzielają się trujące opary ołowiu.

4.3.2 Rozmieszczenie elementów na powierzchni układu drukowanego

W centralnej części obwodu drukowanego umieszczono mikroprocesor. Górną krawędź układu zajmują konektory peryferiów, dolna krawędź została przeznaczona na elementy służące interakcji z użytkownikiem. Płytką została wykonana w technologii mieszanej, w celu zaoszczędzenia miejsca starano się używać elementów montowanych powierzchniowo, tam gdzie było to możliwe i wygodne. Podczas prowadzenia ścieżek układu należy mieć na uwadze ich szerokość. Znając parametry techniczne płytki oraz prądy płynące przez poszczególne ścieżki można obliczyć ich minimalną szerokość za pomocą kalkulatorów dostępnych online. Obudowę rezonatora kwarcowego oddzielono od powierzchni obwodu wyciętą gumą. Na obudowach elementów aktywnych umieszczono radiatory.

5 Projekt podwozia robota

W celu zwiększenia trwałości i solidności podwozia zdecydowano się zaprojektować własne oraz wydrukować je w technologii 3D. Podwozie zaprojektowano tak aby osiągnąć jego modułowość. Platforma robota składa się z osobnych części:

- głównego podwozia z uchwytami na silniki,
- dwóch obudów na czujniki szczelinowe,
- uchwytu na serwomechanizm,
- elementu mocującego czujnik ultradźwiękowy na szczycie serwomechanizmu,
- obudowy baterii.

Obudowy komponentów są łączone z podwoziem śrubami. Jeżeli zaistniałaby potrzeba wymiany danego komponentu, np. serwomechanizmu, to wystarczy na nowo wydrukować jedynie nową obudowę na wymieniany komponent. W obudowie uwzględniono utworzenie otworów oraz uchwytów na kable. Bateria zasilająca układ jest połączona z obwodem przez przełącznik dwupozycyjny.

6 Synteza układów regulacji

Budowa i testy układu prototypowego wykazały, że bez zastosowania dodatkowych środków układ porusza się w sposób nieprecyzyjny. Zdecydowano się na synteze układów regulacji w celu poprawienia precyzji działania robota.

6.1 Regulator synchronizacji prędkości silników

g

- 6.2 Kaskadowy regulator skrętu platformy
- 6.3 Identyfikacja obiektu regulacji
- 6.4 Strojenie regulatorów
- 7 Implementacja programistyczna
- 8 Wykorzystane technologie
- 9 Perspektywy rozwoju, podsumowanie