

Grzegorz KŁAPYTA, Grzegorz ZIEROLD
Katedra Mechatroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska

KROCZĄCY ROBOT MOBILNY WYKONANY ZGODNIE Z FILOZOFIĄ BEAM

Streszczenie. Pod koniec lat 90. XX wieku Mark W. Tilden zaproponował nowatorską filozofię projektowania robotów, którą określa się akronimem BEAM. W myśl tej filozofii roboty powinny mieć jak najprostszą konstrukcję. Rezygnuje się ze sterowania zalgorytmizowanego na rzecz sterowania behawioralnego zapewnianego przez zbudowanie sztucznej sieci nerwowej robota. Takie rozwiązanie upodabnia roboty do istot żywych. W artykule przedstawiono podstawowe założenia robotyki BEAM oraz opisano projekt robota „Greg Walker”, wykonanego w ramach pracy dyplomowej magisterskiej realizowanej w Katedrze Mechatroniki. „Greg Walker” to niewielki robot kroczący zrealizowany zgodnie z założeniami BEAM. Potrafi on samodzielnie poszukiwać źródła światła do zasilania swoich akumulatorów poprzez zestaw ogniw fotowoltaicznych oraz omijać przeszkody wykryte za pomocą „wąsów”.

Słowa kluczowe: roboty BEAM, roboty mobilne, sztuczny neuron

WALKING ROBOT DESIGNED ACCORDING TO THE BEAM PHILOSOPHY

Summary. The paper describes basic assumptions of BEAM robotics introduced at the end of XX Century by Mark W. Tilden. BEAM is an acronym coming from: *Biology, Electronics, Aesthetics, and Mechanics*. BEAM robots do not have control algorithms but use artificial neural networks to control robot's behavior. Paper describes also description of BEAM-like robot “Greg Walker” designed and constructed in Department of Mechatronics at Silesian University of Technology in frame of MsC Thesis. Greg Walker is small walking robot able to look for light sources and to omit obstacles.

Keywords: BEAM robots, mobile robots, artificial neurons

1. WPROWADZENIE

Robotyka jest dziedziną o ugruntowanej pozycji w technice i nauce. Tradycyjne rozwiązania robotów, zarówno przemysłowych, jak i wszelkich innych, oparte są zwykle na filozofii centralnego sterowania poprzez algorytm zapisany w postaci programu w pamięci

mikroprocesora lub sterownika. Tego typu roboty sprawdzają się bardzo dobrze tam, gdzie występują powtarzalne warunki pracy oraz przewidywalne zakłócenia. Nowatorską metodą podejścia do konstruowania robotów jest zapoczątkowana w latach 90. XX wieku przez Marka W. Tildena filozofia robotów BEAM. BEAM to akronim, pochodzący od angielskich wyrazów *Biology*, *Electronics*, *Aesthetics*, and *Mechanics* – co oznacza Biologia, Elektronika, Estetyka i Mechanika. Co łączy te cztery, wydawałoby się odległe, dziedziny?

2. ZAŁOŻENIA FILOZOFII “BEAM ROBOTICS”

Podstawowe cechy, wyróżniające roboty BEAM to biomorfizm i autonomia. Wizją Marka Tildena było stworzenie robotów niezależnych od człowieka, „żyjących własnym życiem”. Układy BEAM opierają się na sztucznych sieciach neuronowych, składających się z elektronicznych odpowiedników neuronów, które łączą sensory z elementami wykonawczymi. Z założenia roboty BEAM są budowane z prostych analogowych elementów i nie są wyposażone w programowane układy sterujące, takie jak np. mikroprocesory. Ta prostota umożliwia zmniejszenie zapotrzebowania na energię oraz minimalizuje możliwość wystąpienia awarii. Roboty BEAM mają symulować zachowanie istot żywych: owadów, gadów, prostych ssaków. Pomysłem Marka Tildena było stworzenie mechanicznych zwierząt, które żyłyby bez pomocy człowieka, same poszukując źródeł energii, tak jak istoty żywe poszukują pożywienia.

Roboty BEAM mają spełniać trzy prawa, zaproponowane przez Marka Tildena.

a) Robot musi chronić swoje istnienie za wszelką cenę.

Wiele robotów typu BEAM posiada różnego rodzaju czujniki, pozwalające na detekcję przeszkód. Są to zwykle mechaniczne wąsy (na podobieństwo do owadów lub małych ssaków), które zapobiegają uderzeniu przez robota w przeszkodę oraz umożliwiają jej ominięcie.

b) Robot musi uzyskać i utrzymać dostęp do źródła energii.

Wyposażenie małego robota w dużą baterię akumulatorów jest bardzo nieefektywne, ponieważ zwiększa ono wielokrotnie jego masę. W wyniku tego trzeba zbudować silniejszą konstrukcję i zastosować mocniejsze napędy. Klóci się to z filozofią BEAM, mówiącą, że układ ma być możliwie najprostszy („keep it simple”). Dlatego roboty te często są

wyposażane w moduły fotowoltaiczne, zapewniające niezależne i w miarę pewne źródło zasilania. Pozwala to na zbudowanie robota, posiadającego długi czas autonomicznej pracy.

c) Robot musi nieustannie poszukiwać lepszego źródła energii.

Poszukiwanie źródła energii stanowi analogię do świata zwierząt, które nieustannie poszukują źródła pożywienia. Wyposażenie robota w fotorezystory lub fotodiody umożliwiło detekcję poziomu oświetlenia i pozwala pokierować robota w stronę mocniej oświetlonych miejsc, oferujących więcej energii dla ogniw zasilających układ. Zachowanie takie jest analogiczne z zachowaniem prostych istot żywych, nieustannie dążących do poprawy warunków własnej egzystencji.



Rys. 1. Przykładowe roboty BEAM [11]

Fig. 1. Examples of BEAM robots

Projektując robota BEAM, powinno się przestrzegać trzech zasad:

- użyć jak najmniejszej liczby elementów i maksymalnie uprościć układ,
- użyć elementów z recyklingu, wymontowanych ze starych urządzeń,
- do zasilania robota wykorzystać energię odnawialną.

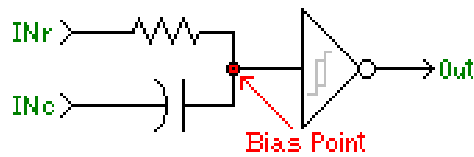
3. SZTUCZNE NEURONY I SIECI NERWOWE

Układ sterowania robotem BEAM, zamiast programu i mikroprocesora, używa „sieci nerwowej”. Sieć taka składa się z wielu sztucznych neuronów. W najprostszej formie neuron BEAM składa się z rezystora, kondensatora oraz inwertera, połączonych w odpowiedni sposób (rys. 2). Układy te są najczęściej używane w jednej z dwóch form:

- „nervous neuron” Nv, używany zwykle do kontroli silników,
- „neural neuron” Nu, służący do obsługi sygnałów z sensorów.

W porównaniu do biologicznych neuronów są to bardzo prymitywne układy, z ograniczonymi możliwościami przetwarzania energii. Mogą naśladować pracę biologicznych neuronów oraz być łączone w większe sieci, w lepszym stopniu odwzorowujące ich

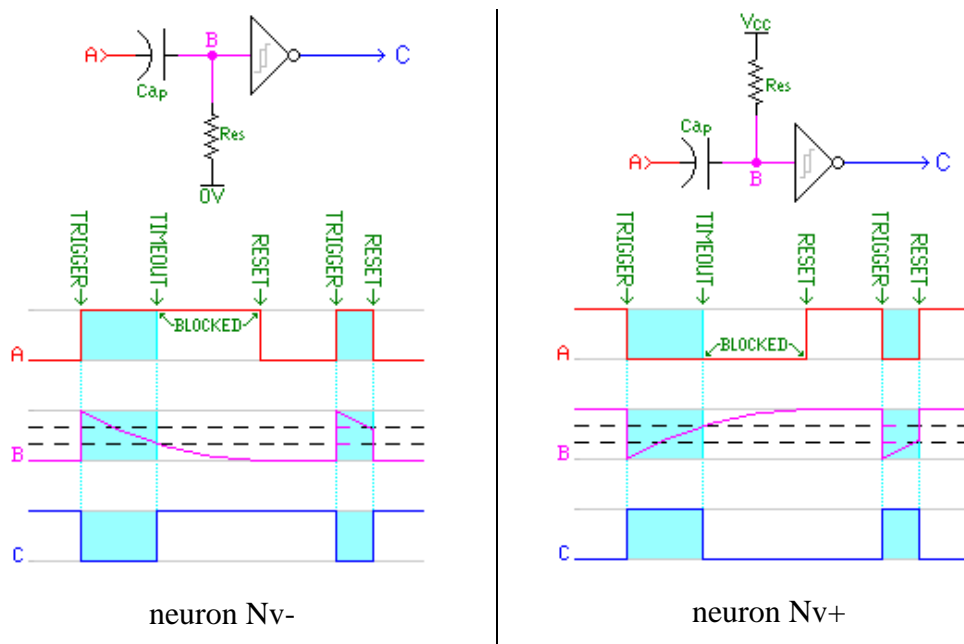
biologiczne odpowiedniki. Można nawet budować z nich złożone sieci, pełniące funkcję centralnego ośrodka nerwowego lub mózgu.

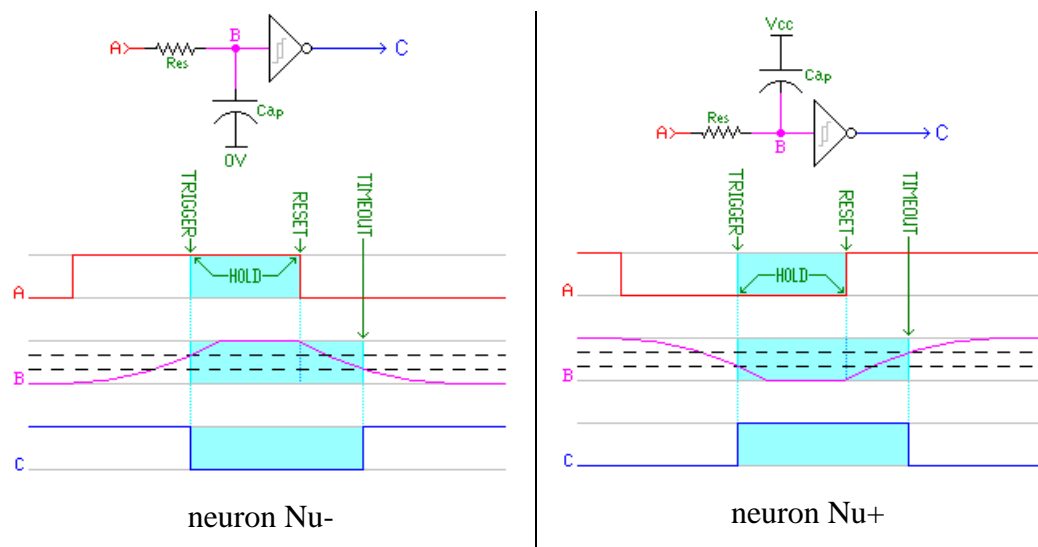


Rys. 2. Podstawowy neuron BEAM [11]
Fig. 2. Basic neuron BEAM [11]

Układ neuronu (rys. 2) zmienia stan wyjścia z wysokiego na niski lub odwrotnie, w zależności od wartości sygnałów INc oraz INr. Zmiana stanu wyjścia jest opisywana jednym parametrem - stałą czasową T_c , której wartość jest zależna od oporu rezystora, pojemności kondensatora oraz progu zadziałania inwertera. W układach tych zwykle stosuje się rezystory o dużych oporach (rzędu megaomów) oraz kondensatory o pojemności rzędu nanofaradów, co w efekcie daje stałą czasową T_c liczoną w sekundach. Ważną cechą tego układu jest wrażliwość na zakłócenia i szumy na wejściu inwertera, jak i na wahania napięcia zasilającego, powodujące różnice w czasie trwania procesu. Jest to jedna z kluczowych zasad w robotyce BEAM.

Każdy z neuronów N_v oraz N_u występuje w dwóch formach (oznaczonych + lub -), różniących się sposobem połączenia elementów. Zestawienie możliwych konfiguracji układów wraz z przebiegami napięć w wybranych punktach przedstawia rysunek 3.





Rys. 3. Układ neuronów Nv^- , Nv^+ , Nu^- , Nu^+ oraz przebiegi napięć w układach [11]
 Fig. 3. Configuration of neurons Nv^- , Nv^+ , Nu^- , Nu^+ and voltages in circuits [11]

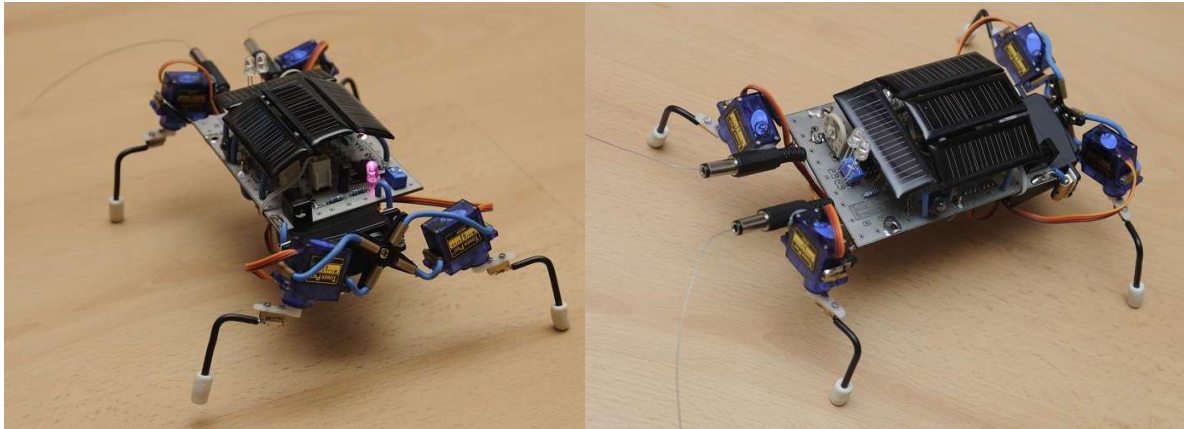
4. PROJEKT ROBOTA „GREG WALKER”

Koncepcja BEAM została sprawdzona w ramach projektu robota krocącego „Greg Walker”. Podstawowym założeniem było zaprojektowanie i zbudowanie go zgodnie z filozofią i prawami podanymi przez Marka Tildena. Duży nacisk położono na optymalizację zużycia energii oraz pozyskiwanie jej z otoczenia, aby zapewnić jak najdłuższy czas autonomicznej pracy robota. Zwrócono również uwagę na zabezpieczenie robota przed uszkodzeniami oraz prostotę układu i jego małą awaryjność. Konstrukcja powinna pozwalać robotowi na długotrwałe, autonomiczne działanie. Założenia projektu uszeregowano według priorytetów:

1. Optymalizacja zużycia energii oraz zdolność do jej pozyskiwania.
2. Zabezpieczenie robota przed uszkodzeniami.
3. Małe skomplikowanie układu.

4.1. Konstrukcja robota

Konstrukcja robota „Greg Walker” przypomina wyglądem robaka. Kadłub robota składa się z płytki PCB, na której są zamontowane wszystkie układy robota. Płytkę PCB, wykonaną z laminatu o wymiarach 105x68x2 mm, jest wystarczająco sztywna, aby stanowić szkielet robota.



Rys. 4. „Greg Walker” podczas chodu; widok z tyłu (z lewej) i z boku (z prawej) [1]
 Fig. 4. „Greg Walker” view from behind (on the left) and from the side (on the right) [1]

4.2. Napęd

„Greg Walker” jest napędzany pięcioma silnikami prądu stałego. Każda noga jest napędzana osobnym serwomechanizmem, a dodatkowy napęd służy do skrętu tułowia robota. Do napędu nóg użyto serwonapędów *Tower Pro SG-90*, natomiast do skrętu tułowia został użyty serwonapęd *Tower Pro SG-5010*. Wszystkie serwonapędy zostały pozbawione modułów sterujących i zostały podłączone bezpośrednio do „układu nerwowego” robota.

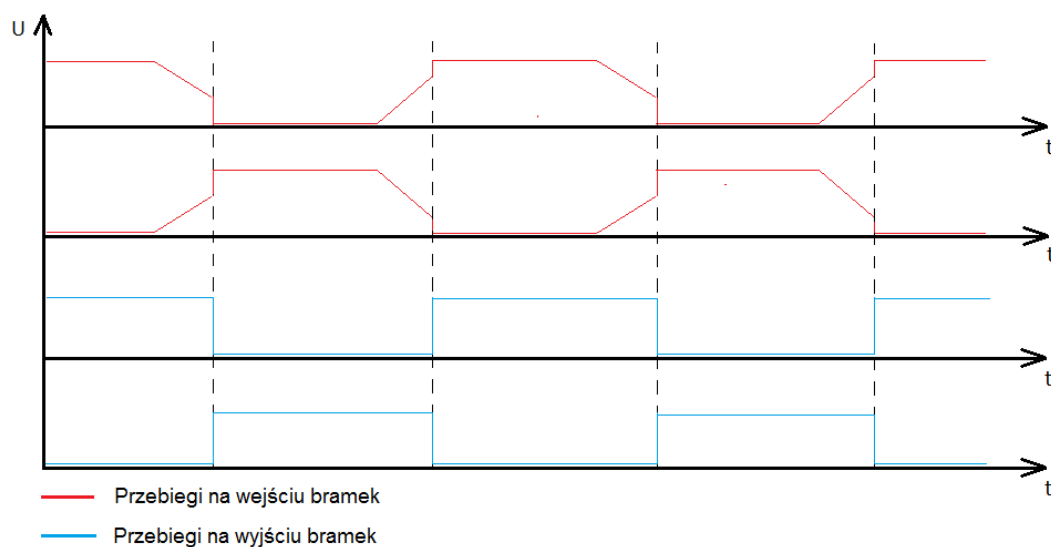
4.3. Układ zasilania

Schemat układu zasilania przedstawiono na rysunku 6c. Układy robota są zasilane z baterii, składającej się z dwóch, szeregowo połączonych akumulatorów litowo-jonowych, dających nominalne napięcie na poziomie 7,2V. Napięcie to jest stabilizowane układem scalonym 7805 do wartości 5V i filtrowane kondensatorem C19 o wartości 100uF. Dodatkowo zostały użyte dwa kondensatory odsprężające C17 i C18 o wartości 1uF. Obecność napięcia w układzie jest sygnalizowana diodą LED1. Układ został wyposażony również w gniazdo zasilające (DC), umożliwiające podłączenie zewnętrznego źródła zasilania w celu naładowania akumulatorów. „Greg Walker” został również wyposażony w cztery, szeregowo połączone, moduły fotowoltaiczne, stanowiące dodatkowe źródło zasilania. Ogniwa zostały umieszczone centralnie na korpusie robota, tworząc pewnego rodzaju osłonę, przykrywającą większą część układu sterowania. Napięcie z modułów fotowoltaicznych jest podawane na akumulatory poprzez diodę Schottkiego 1N5818, zabezpieczającą przed rozładowaniem się akumulatorów przez nieoświetlone ogniwa. Głównym zadaniem ogniw jest doładowywanie akumulatorów robota przy sprzyjających warunkach oświetleniowych. „Greg Walker” został wyposażony również w dwa elementy światłoczułe (fotodiody D7 i D8

na rys. 6a), umieszczone po obu stronach robota, umożliwiające jego kierowanie w stronę silniejszego promieniowania świetlnego.

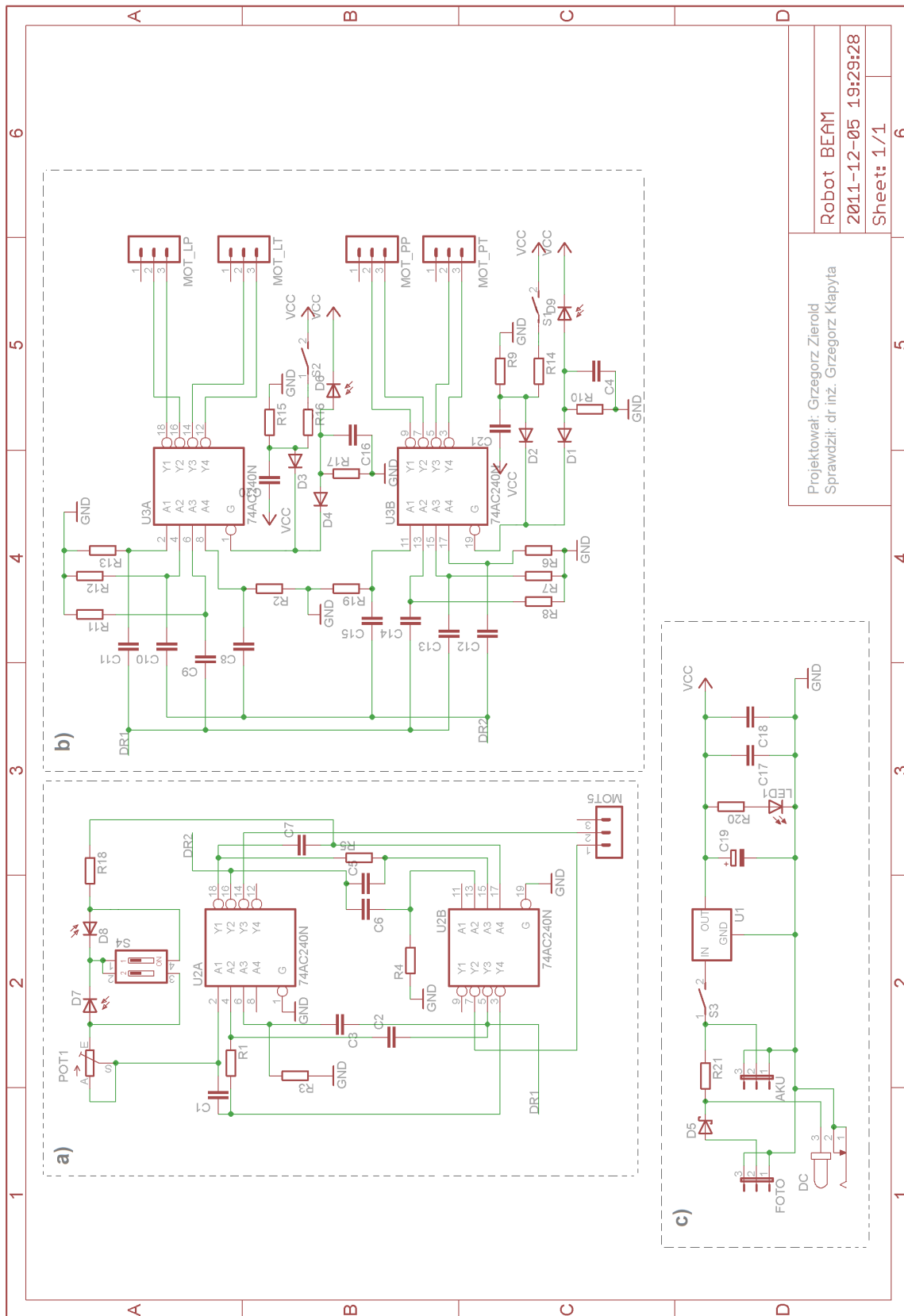
4.4. Zasada działania

Działanie robota opiera się na dwóch układach scalonych 74AC240. Układ ten jest ośmiokanałowym buforem ze sterownikami linii oraz 3 stanowymi wyjściami. Jest bardzo popularny w robotyce BEAM, ponieważ zawiera osiem inwerterów, dzięki którym w szybki sposób można zbudować prostą sieć Nv lub Nu. „Mózgiem” „Greg Walkera” jest układ U2 (74AC240) (rys. 6a). W układzie tym są zamknięte dwa rdzenie sterujące zachowaniem robota. Pierwszy z nich (fotordzeń) wytwarza główne oscylacje, sterujące całym robotem. Oscylacje te mogą być zmieniane dzięki zastosowanym w układzie fotodiodom D7 i D8, które w zależności od natężenia światła zmieniają częstotliwość oscylacji. Przy bardzo słabym oświetleniu częstotliwość jest bardzo niska - impulsy praktycznie zanikają. Wraz ze wzrostem natężenia światła częstotliwość rośnie. W układzie są zastosowane dwie diody połączone szeregowo i odwrotnie spolaryzowane względem siebie. Do każdej z diod jest podłączony równolegle dip-switch. Umożliwia on opcjonalne szybkie zmostkowanie fotodiod oraz zadanie częstotliwości oscylacji niezależnie od warunków oświetlenia poprzez potencjometr POT1. Regulacja czasu oscylacji polega na zmianie stałej czasowej układu RC, zmieniającej czas wyzwalania inwerterów (inwertery A1-Y1 oraz A4-Y4).



Rys. 5. Przebiegi napięć na wejściach i wyjściach inwerterów fotordzenia

Fig. 5. Input and output voltages for photo-core inverters



Projektował: Grzegorz Zierold
 Sprawdził: dr inż. Grzegorz Kłapyta
 Robot BEAM
 2011-12-05 19:29:28
 Sheet: 1/1

Rys. 6. Schemat ideowy układów robota „Greg Walker” (układ „fotordzenia”(a); układ „motordzenia” (b); układ zasilania (c))

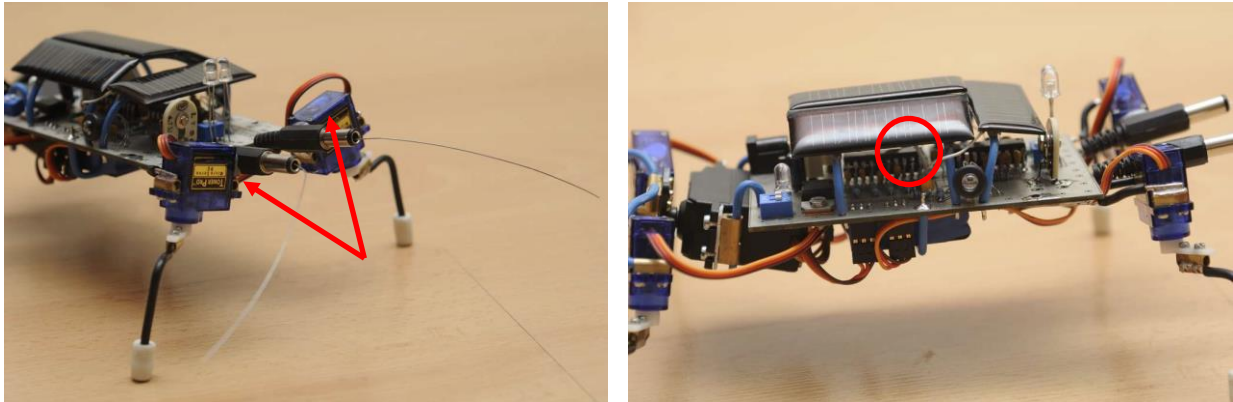
Fig. 6. Schemes for „Greg Robot” systems (photo-core (a); motor-core (b); supply circuit (c))

Drugim układem jest motordzeń (rys. 6b), generujący oscylacje sterujące pracą silników. Jest on uzależniony od pracy fotordzenia, który ustala częstotliwość impulsów, podczas gdy kolejny układ RC w motordzeniu ustala długość impulsów, i tym samym czas pracy silników. Układ U3 steruje silnikami napędzającymi nogi robota. Został on zastosowany w celu zmniejszenia obciążenia prądowego układu U2. Sterowanie układu U3 pochodzi bezpośrednio z układu U2, a czasy impulsów wszystkich silników są takie same, ustalone przez rezystory o wartości $1\text{M}\Omega$ oraz kondensatory 220 nF . Do układu U3 zostały podłączone również fotodetektory i czujniki dotykowe.

Linia sterująca układów U2 i U3 jest podłączona na stałe do masy, co sprawia, że wszystkie inwertery w stanie nieaktywnym posiadają na wyjściu stan wysoki. Na obydwu zaciskach silnika jest podawany stan wysoki z inwerterów. Ruch silnika następuje wówczas, gdy jeden z inwerterów aktywuje się, zmieniając swój stan wyjściowy na niski. Wtedy na silniku pojawia się różnica potencjału, zaś kierunek obrotów silnika zależy od aktywności inwerterów, do których jest podłączony dany silnik.

4.5. Czujniki

„Greg Walker” został wyposażony w trzy rodzaje czujników. Pierwszy z nich to czujnik optyczny, składający się z fotodiod D7 i D8, opisanych powyżej. Pozwalają one robotowi dostosować prędkość działania do natężenia oświetlenia. Umiejscowione są centralnie z przodu, na wysokości ogniw fotowoltaicznych. Kolejny czujnik optyczny realizują fotodiody D6 i D9. Służą one do detekcji silnego światła. Umiejscowione są po bokach robota i skierowane odpowiednio w prawo i w lewo. W momencie oświetlenia danej fotodiody robot skręca w stronę silniejszego światła. Działanie polega na zablokowaniu jednej linii sterującej w układzie U3, dzięki czemu robot porusza nogami tylko z jednej strony, co powoduje jego skręcanie. Ostatnim sensorem zainstalowanym w robocie „Greg Walker” są czujniki dotykowe (wąsy), które są umiejscowione z przodu robota. Ich celem jest wykrywanie przeszkód na drodze robota, tak aby mógł je omijać. Zasada działania jest podobna jak w przypadku detektorów światła - impuls z „wąsów” blokuje odpowiednią linię sterującą, która wyłącza odpowiednią parę silników, powodując skręcanie robota.



Rys. 7. Czujniki dotykowe (z lewej), oraz czujnik natężenia oświetlenia (z prawej) [1]
Fig. 7. Tactile sensors (on the left) and light power sensor (on the right) [1]

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Robotyka BEAM spotkała się z wielkim zainteresowaniem na świecie - wiele osób zaczęło konstruować swoje własne roboty zgodnie z tą filozofią. Ta filozofia zaraziła również autorów i zachęciła do samodzielnych eksperymentów. „Greg Walker” został zaprojektowany i zbudowany według założeń i praw Marka Tildena. Unika przeszkód, potrafi pozyskiwać energię ze środowiska oraz poszukuje lepszych jej źródeł. Idea Marka Tildena została sprawdzona i potwierdzona doświadczalnie. „Greg Walker” to robot bardzo prosty, posiadający zaledwie kilka funkcji. Ta prostota stanowi jednak o jego sile. Potrafi on samodzielnie poszukiwać lepiej oświetlonych miejsc i w pełnym słońcu dostaje wigoru. Po zapadnięciu zmroku i wyładowaniu baterii – uśpiony oczekuje na poranek, by przebudzić się do życia.

BIBLIOGRAFIA

1. Zierold G.: Roboty Marka Tildena – filozofia robotyki BEAM. Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2011.
2. Hasslacher B., Tilden M. W.: Living Machines, Los Alamos National Laboratory USA, Los Alamos, NW, 87545.
3. Tilden M., Hasslacher B., Mainieri R., Moses J.: Autonomous Biomorphic Robots as Platform for Sensors, 1996.
4. Janette R. Frigo, M. W. Tilden: Analog neural network control method proposed for use in a backup satellite control mode, Los Alamos National Laboratory MSD466/NIS, Los Alamos, NW, 87545.

5. Still S., Tilden M. W.: Controller for a four legged walking machine, ETH Zuerich, Institute of Neuroinformatics, Gloriastr.32, CH-8006 Zuerich, Switzerland Biophysics Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA.
6. Chapman T., Adam T., Tilden M. W.: Reactive Maze Solving with a Biologically-Inspired Wind Sensor, Department of Psychology, University of Stirling, Scotland, FK9 4DN, UK; Hayes MS136-93, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA; MSA454, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA.
7. Tilden M. W.: The Design of "Living" Biomech Machines: How low can one go?' Physics Division, Los Alamos National Laboratory 505/667-2902.
8. Hasslacher B., Tilden M. W.: Theoretical Foundations for Nervous Nets and the Design of Living Machines, Los Alamos National Laboratory USA, Los Alamos, NW, 87545.
9. Tilden M. W.: Biomorphic Robotics and Nervous Net Research: A New Machine Control Paradigm, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA.
10. Feder B. J.: Toyland Is Tough, Even for Robots, The New York Times, interview with Mark Tilden.
11. www.beam-wiki.org

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Mitkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 listopada 2011 r.

Dr inż. Grzegorz KŁAPYTA

Politechnika Śląska. Wydział Elektryczny

Katedra Mechatroniki

ul. Akademicka 10A, 44-100 GLIWICE

tel.: 032 2372615; e-mail.: grzegorz.klapyta@polsl.pl

Grzegorz ZIEROLD

Student Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej,

specjalność: Komputerowe Systemy Sterowania