



Krystaliczne ogniwa słoneczne i ich praktyczne zastosowanie

S. Nowak^a, M. Musztyfaga^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
email: slawekn1123@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: malgorzata.musztyfaga@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia praktyczne zastosowanie ogniw fotowoltaicznych jako alternatywnego źródła energii dla robota mobilnego poruszającego się po wyznaczonym torze. Wykorzystane w artykule ogniwa fotowoltaiczne zostały wykonane na bazie krzemu monokrystalicznego.

Abstract: The paper shows the practical use of photovoltaic cells as an alternative source of energy for mobile robot moving along a fixed track. Applied in the paper photovoltaic cells were done on the basis of monocrystalline silicon.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, ogniwo fotowoltaiczne, krzem krystaliczny, monokryształ, system fotowoltaiczny

1. WSTĘP

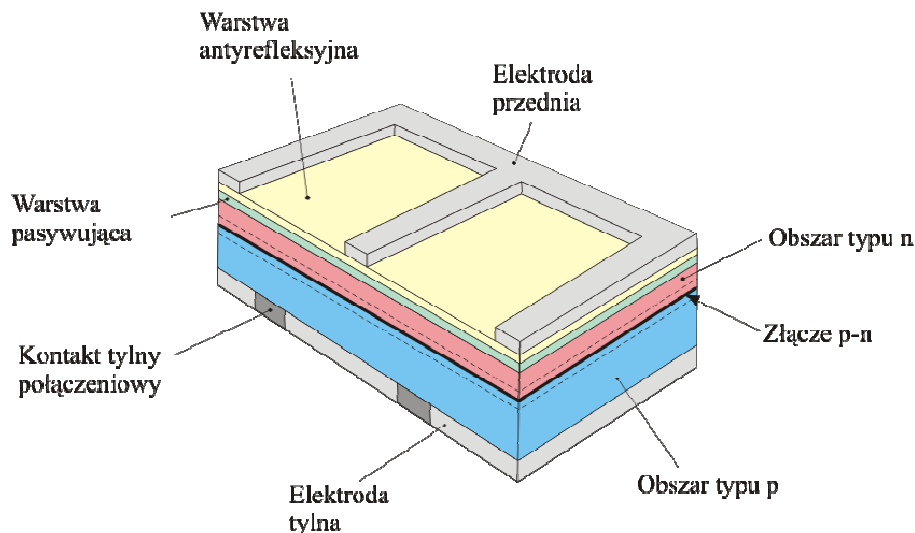
Energia elektryczna jako podstawowe medium dzisiejszych czasów jest wykorzystywana w każdej dziedzinie życia człowieka, dlatego też bardzo ważnym aspektem jest rozwój technologii pozyskiwania energii elektrycznej. Alternatywą dla konwencjonalnych źródeł energii (m.in. ropy naftowej, węgla, gazu) jest „energetyka słoneczna”, którą można określić jako sposób konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną [1].

Konwersja ta nazywana jest efektem fotowoltaicznym i zachodzi przy użyciu urządzeń nazywanych ogniwami fotowoltaicznymi (ogniwami słonecznymi, komórkami fotowoltaicznymi, ogniwami PV). Ogniwo słoneczne definiowane jest jako element półprzewodnikowy o pojedynczym złączeniu p-n, w którym pod wpływem promieniowania słonecznego generowana jest siła elektromotoryczna [2].

2. BUDOWA OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO

Współcześnie dominującym oraz bazowym materiałem na rynku elektronicznym wykorzystywanym do budowy ogniw fotowoltaicznych jest krzem. W fotowoltaice jest on stosowany pod trzema postaciami: 1) monokrystalicznej, 2) polikrystalicznej, 3) amorficznej.

Do budowy ogniw słonecznych wykorzystuje się także arsenek galu, tellurek kadmu czy też fosforek indu. Schemat budowy ogniwa monokrystalicznego p-n przedstawiono na rysunku 1 [3].



Rysunek 1. Przykładowa budowa ogniwa fotowoltaicznego [3]

Figure 1. Example of the construction of a photovoltaic cell [3]

Jednym z elementów tworzących ogniwo fotowoltaiczne jest półprzewodnik, na którego budowę składa się [4]:

- warstwa antyrefleksyjna,
- warstwa pasywująca,
- teksturyzacja powierzchni,
- obszar typu p,
- obszar typu n,
- przednia i tylna elektroda.

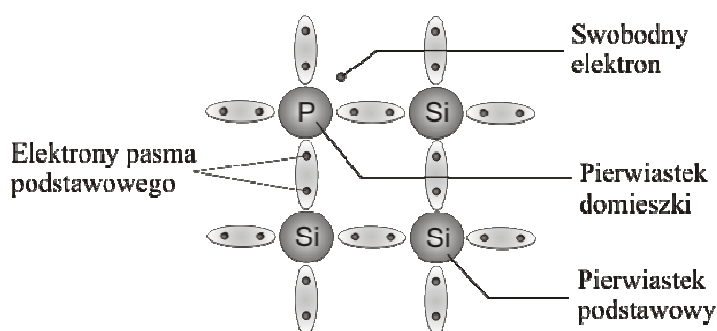
Warstwa antyrefleksyjna ARC (ang. *Anty Reflection Coat*), jest jednym z czynników wpływających na sprawność ogniwa. Warstwa ta ma duże znaczenie ponieważ, głównym jej zadaniem jest zwiększenie absorpcji promieni słonecznych poprzez ich załamywanie [5].

Warstwa pasywująca PSG (ang. *Phosphorous Siliate Glass*) – warstwę tę wykonuje się w celu zmniejszenia prędkości rekombinacji nośników ładunków. Warstwa pasywująca zmniejszając prędkość rekombinacji pary dziura-elektron, powoduje wydłużenie czasu życia nośników ładunków, a co za tym idzie prowadzi do poprawy parametru gęstości prądu zwarcia ogniwa (zwiększa uzyskiwany prąd nawet o 20%) [6, 7].

Teksturyzacja powierzchni jest to jedna z modyfikacji mająca wpływ na sprawność ogniwa poprzez zmianę kierunku padania promieni odbitych. Teksturyzację wykonuje się poprzez trawienie krzemu z różnymi prędkościami w określonych kierunku (w płaszczyznach 100, 111, 110). Trawienie ujawnia tetraedryczną strukturę, czyli powoduje powstanie na powierzchni piramidalnej warstwy. Warstwa ta ma największe zastosowanie przy ogniwach z krzemu monokrystalicznego [5].

Obszar typu n jest cienką warstwą krzemu zwaną także emiterem, czyli półprzewodnikiem, którego podstawowym nośnikiem energii jest elektron, a jej grubość sięga zaledwie kilku mikrometrów. Mniejsza grubość warstwy n umożliwia tworzenie dużej liczby nośników w samym złączu lub też w jego pobliżu, a następnie ich dyfuzję poprzez złącze [6].

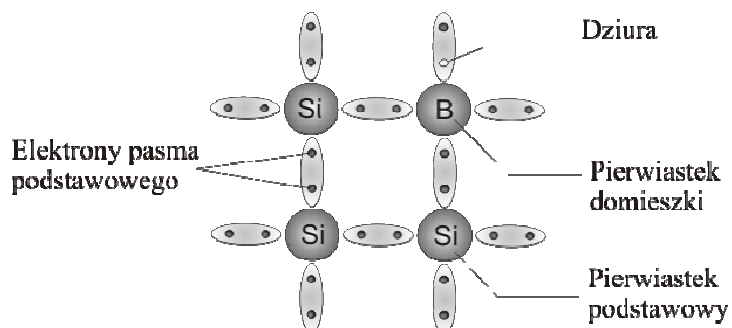
Półprzewodnik typu n otrzymuje się poprzez domieszkowanie czterowartościowego krzemu, pierwiastkami z V grupy układu okresowego zawierających pięć elektronów walencyjnych. Domieszki do półprzewodnika podstawowego nazywa się domieszkami donorowymi. Pierwiastkami najczęściej stosowanymi do domieszkowania są arsen (As), antymon (Sb), bizmut (Bi) oraz fosfor (P). Sieć krystaliczną domieszkowanego krzemu przedstawiono na rysunku 2 [7].



Rysunek 2. Wiązanie międzyatomowe półprzewodnika niesamoistnego typu n z domieszką fosforu [7]

Figure 2. Interatomic combining the semiconductor of the non-intrinsic type n with the additive of phosphorus [7]

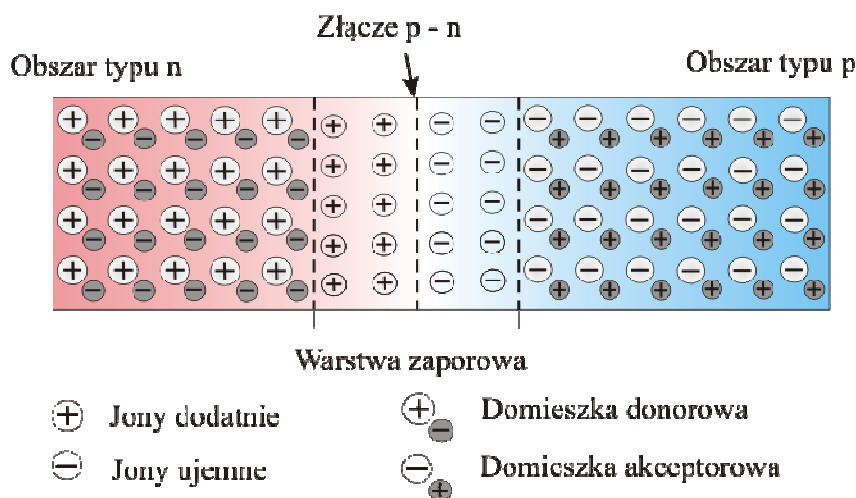
Obszar typu p zazwyczaj jest bazą dla warstwy „n”, a jego nośnikiem podstawowym jest dziura o ładunku dodatnim [6]. W tym przypadku dziura jest zarazem większościowym nośnikiem w paśmie walencyjnym, natomiast elektron jest nośnikiem mniejszościowym w paśmie przewodnictwa. W celu stworzenia obszaru p, półprzewodnik podstawowy domieszkowany jest pierwiastkami z grupy III układu okresowego m. in. takimi jak bor (B), aluminium (Al), gal (Ga), tal (Tl) oraz ind (In). Są to pierwiastki posiadające trzy elektrony w powłoce walencyjnej i nadają półprzewodnikowi przewodnictwo o charakterze dziurowym. Domieszki nazywane są domieszkami akceptorowymi. Sieć krystaliczną krzemu domieszkowanego borem przedstawiono na rysunku 3 [4-9].



Rysunek 3. Sieć krystaliczna półprzewodnika typu p, krzem z domieszką boru [7]

Figure 3. Crystal lattice of the semiconductor of the p type, silicon with the additive of the boron [7]

Złącze p-n powstaje w miejscu połączenia półprzewodników typu p i typu n (rys. 4), jego grubość przykładowo może wynosić ok. 0,1 μm .



Rysunek 4. Półprzewodnik typu n i typu p, powstanie złącze p-n [9]

Figure 4. The semiconductor of the n and p type, the forming the p-n junction [9]

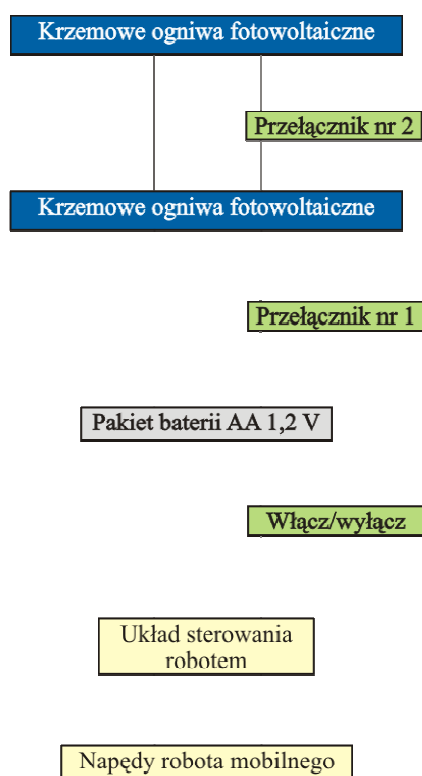
Podstawowym zadaniem złącza p-n jest stworzenie warunków dla powstania efektu fotowoltaicznego oraz wytworzenia prądu w obwodzie ogniwa i odbiornika. W przypadku, gdy półprzewodniki typ p i n stykają się ze sobą to zgodnie z prawem dyfuzji elektrony z obszaru n dyfundują do obszaru p, natomiast dziury z obszaru p do obszaru n, aż do uzyskania stanu równowagi w pobliżu złącza. W ten sposób powstają bariery przeciwdziałające dalszej dyfuzji, a poziomy Fermiego w obu częściach układu wyrównują się. Najbardziej istotną cechą złącza p-n jest tworzenie się w nim warstwy zaporowej, która ma tendencję do przewodzenia elektrycznego tylko w jednym kierunku [9].

Połączenie elektrody przedniej lub tylnej z półprzewodnikiem nosi nazwę złącza metal-półprzewodnik. Głównym zadaniem elektrod jest odprowadzenie ładunku elektrycznego z ogniwa fotowoltaicznego do obwodu zewnętrznego i zasilenie odbiornika podłączonego do ogniwa energią elektryczną. Elektroda przednia powinna w jak najmniejszym stopniu przysłaniać powierzchnię czynną półprzewodnika oraz zapewnić najmniejszą rezystancję wierzchniej części ogniwa fotowoltaicznego w celu uzyskania optymalnie jak największej sprawności. Elektroda tylna wykonywana jest najczęściej jako jednolita warstwa przyłączeniowa do ogniwa słonecznego, na tylnej jego powierzchni. Elektroda tylna może składać się z dwóch lub większej ilości warstw różnych metali w celu uzyskania odpowiednich własności mechanicznych, chemicznych i elektrycznych [6].

3. WYKONANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO I ROBOTA MOBILNEGO

W ramach pracy badawczej zbudowano model robota mobilnego poruszającego się po torze, zasilanego energią słoneczną przetworzoną na energię elektryczną przy pomocy wykonanego mini modułu fotowoltaicznego. Pracę wykonano na podstawie dokonanego przeglądu literatury oraz nabytej wiedzy i doświadczenia w budowie modeli kolekcjonerskich.

Schemat ideowy robota mobilnego wykonanego w ramach pracy badawczej przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Schemat ideowy systemu fotowoltaicznego
Figure 5. Schematic diagram of the photovoltaic system

3.1. Budowa systemu fotowoltaicznego

Do budowy mini modułu fotowoltaicznego wykorzystano 54 krzemowe monokrystaliczne ogniwa słoneczne (rys. 6).



Rysunek 6. Monokrystaliczne ogniwa słoneczne
Figure 6. Monocrystalline solar cells

Ogniwa słoneczne o wymiarach 156 x 156 x 0,259 mm pocięto laserowo na mniejsze kawałki. Wymiary pociętych ogniw zestawiono w tablicy 1. Średnie wartości parametrów elektrycznych wykorzystanych ogniw przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 1. Parametry gabarytowe ogniw fotowoltaicznych

Table 1. Overall parameters of photovoltaic cells

| Własności | Wartość, mm |
|-------------------------------|-------------|
| Szerokość ogniwa | 12,3 |
| Długość ogniwa | 29,4 |
| Grubość ogniwa | 0,3 |
| Szerokość szyny zbiorczej | 1,2 |
| Szerokość ścieżki zbierającej | 0,2 |

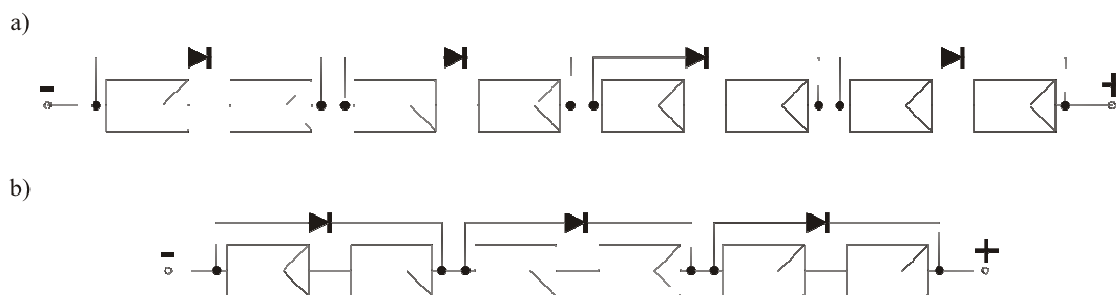
Tablica 2. Parametry elektryczne ogniw fotowoltaicznych

Table 2. Electrical parameters of photovoltaic cells

| Własności | Wartość |
|---|---------|
| Moc maksymalna, mW | 40 |
| Natężenie przy max mocy (I_m), mA | 80 |
| Napięcie przy max mocy (U_m), V | 0,48 |
| Napięcie obwodu otwartego (U_{oc}), V | 0,61 |
| Prąd zwarcia (I_{sc}), mA | 90 |
| Współczynnik wypełnienia (FF) | 0,77 |
| Sprawność (η), % | 15 |

Do łączenia ogniw fotowoltaicznych wykorzystano specjalnie przeznaczoną do tego ocynowaną taśmę.

Zastosowane ogniwa zostały połączone szeregowo w sześć grup po osiem ogniw oraz jedną grupę składającą się z sześciu ogniw zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.



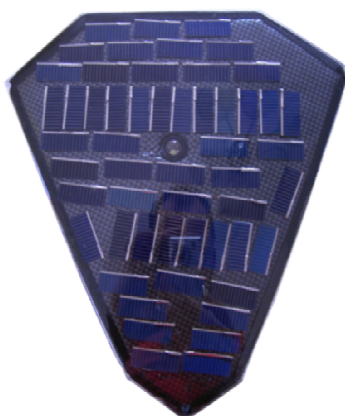
Rysunek 7. Połączenie szeregowo: a) ośmiu ogniw fotowoltaicznych, b) sześciu ogniw fotowoltaicznych

Figure 7. Serial connection: a) eight photovoltaic cells, b) six photovoltaic cells

Każda z grup ogniw połączonych szeregowo została zabezpieczona diodami prostowniczymi. Jedna dioda przypada na dwa ogniwa fotowoltaiczne, jest z nimi połączona równolegle zgodnie z przedstawionym schematem. Połączone ogniwa fotowoltaiczne zostały umieszczone w hermetycznej obudowie (rys. 8).

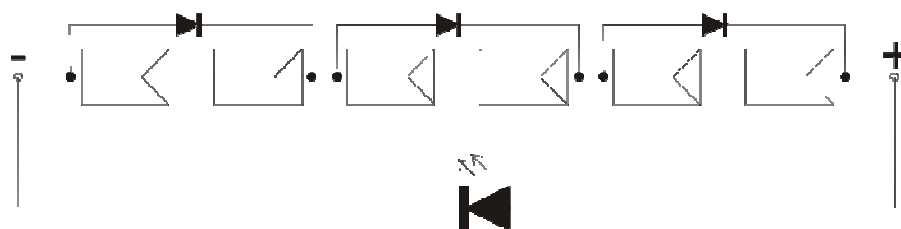
Wykonany moduł fotowoltaiczny połączono z przełącznikami sześciokanałowymi 1 i 2, a następnie z pakietem sześciu akumulatorów typu AA.

Na każdej z gałęzi 8 ogniw słonecznych połączonych szeregowo, umieszczono diodę prostowniczą na złączu dodatnim w celu uniknięcia rozładowywania akumulatorów.



Rysunek 8. Moduł fotowoltaiczny
Figure 8. Photovoltaic module

W środkowej części modułu fotowoltaicznego umieszczono diodę LED, której zadaniem jest sygnalizacja możliwości ładowania akumulatorów AA. Dioda jest podłączona bezpośrednio do grupy składającej się z sześciu ogniw słonecznych (rys. 9).

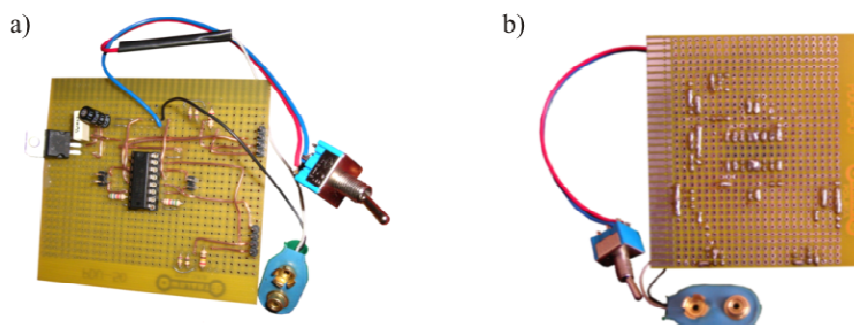


Rysunek 9. Schemat połączenia diody LED z grupą sześciu fotoogniw
Figure 9. Scheme of connection LED with a group of six photo-elements

3.2. Budowa układu sterowania

Zadaniem układu sterowania jest odbieranie sygnałów wytwarzanych przez czujniki odbiciowe oraz generowanie przy pomocy układu scalonego odpowiedzi w postaci włączenia lub wyłączenia napędów robota.

Układ elektryczny wykonano na płytce laminowanej uniwersalnej, rzeczywisty wygląd wykonanego układu sterowania przedstawia rysunek 10.



Rysunek 10. Układ sterowania – strona: a) awers, b) rewers
Figure 10. The control system – the side: a) obverse, b) reverse

Do układu sterowania może być doprowadzone dowolne napięcie z zakresu od 5 do 36 V. W układzie zastosowano stabilizator, który przetwarza napięcie wejściowe na napięcie o wartości 5 V przeznaczone dla odpowiednich pinów układu scalonego oraz czujników odbiciowych. Pozostała część układu zasilana jest napięciem doprowadzonym do układu (nie zredukowanym przez stabilizator). W płytce uniwersalnej umieszczono złącza kołkowe, które służą jako szybko-złączki dla napędów oraz czujników odbiciowych, umożliwia to łatwy demontaż układu sterowania bez potrzeby wylutowywania podzespołów. Następnie układ sterowania umieszczono w komorze wykonanej z grubej plexi.

3.3. Konstrukcja robota mobilnego

Konstrukcja umożliwia połączenie ze sobą wszystkich potrzebnych do działania podzespołów robota oraz zapewnia zdolność poruszania się robota po wyznaczonym torze.

Konstrukcja robota składa się z trzech części:

- podwozia,
- komory układu sterowania,
- obudowy akumulatorów AA.

Podwozie jako element nośny układu napędowego wykonano z matowej plexi. Następnie wykonano w podwoziu dwa otwory w których umieszczono czujniki odbiciowe. Odległość pomiędzy czujnikami określa szerokość linii po której może się poruszać robot mobilny. W następnym etapie wykonano komorę układu sterowania, która została wycięta z plexi, zakończenia ścianek (część przednia) zostały poddane gięciu pod wpływem ciepłego powietrza w celu dopasowania ich kształtu do bazowego podłoża komory. Wszystkie elementy dokładnie wyrównano i przyklejono klejem montażowym. Na rysunku 11 przedstawiono konstrukcję komory układu sterowania robota mobilnego.



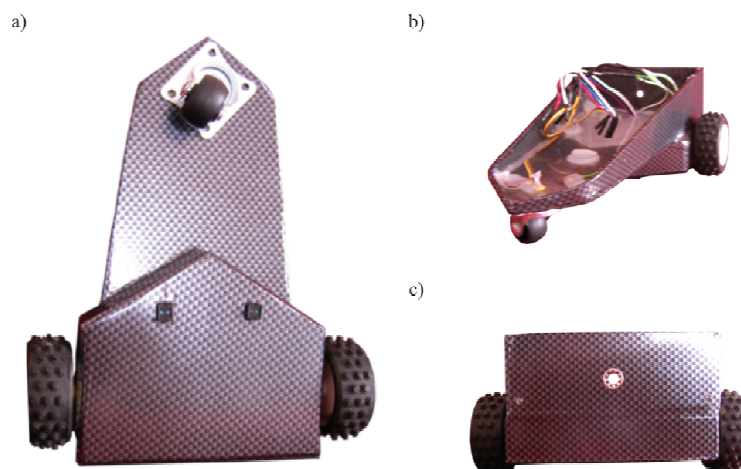
Rysunek 11. Komora układu sterowania

Figure 11. Chamber of the control system

W podłożu komory wykonano otwór w celu późniejszego przeprowadzenia wiązki elektrycznej do zasilania napędów oraz czujników odbiciowych. W ściankach wywiercono gniazda przeznaczone dla czterech diod LED oraz przełączników: włącz/wyłącz uruchamiającego robota, przycisku ładowania oraz przycisku przyspieszonego ładowania akumulatorów zasilających robota. W kolejnym etapie połączono podwozie z komorą, wstępnie przy pomocy kleju termoplastycznego, a w późniejszym etapie klejem montażowym. W celu utrzymania stabilności oraz ułatwienia skrętu robota pod przednią częścią konstrukcji umieszczono kołko obrotowe (meblowe). Tak połączone elementy zostały zabezpieczone folią termokurczliwą w kolorze karbonowym nadającą estetyczny wygląd (rys. 12).

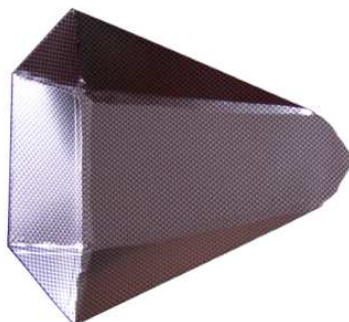
W następnym etapie została wykonana obudowa podtrzymująca pakiet akumulatorów AA. Zadaniem wykonanego elementu jest osłonięcie układu sterowania oraz umożliwienie utwierdzenia pakietów akumulatorów AA w sposób umożliwiający ich demontaż w dowolnej chwili.

Obudowa została wykonana z plexi, wycięte części składowe zostały połączone klejem montażowym, a następnie zabezpieczone folią termokurczliwą (rys. 13).



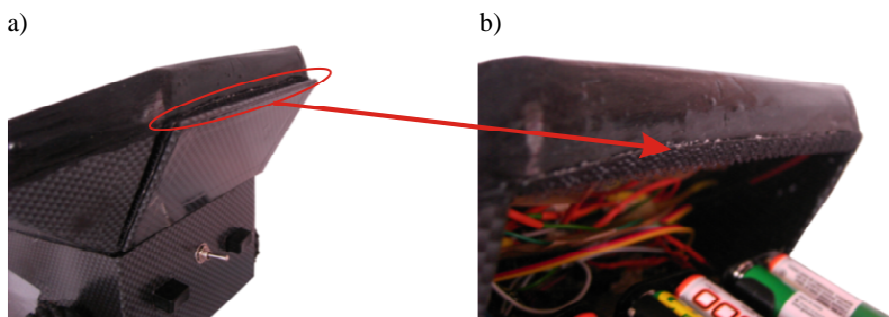
Rysunek 12. Konstrukcja robota mobilnego z zamocowanymi napędami i czujnikami odbiciowymi: a) widok z dołu, b) widok z przodu, c) widok z tyłu

Figure 12. Structure of the mobile robot with fastened drives and reflection sensors: a) view from the bottom, b) a front view, c) rear view



Rysunek 13. Obudowa akumulatorów z folią karbonową

Figure 13. Casing of batteries with the carbonic foil



Rysunek 14. Drzwiczki dostępu do akumulatorów: a) tył robota mobilnego, b) powiększenie przyklejonej taśmy (rzep)

Figure 14. Door access to batteries: a) the back of a mobile robot, b) enlargement stuck tape (velcro)

Tylna ścianka elementu została odcięta w celu wykonania z niej drzwiczek dostępu do akumulatorów AA. W tym celu na łączeniu ścianki z pozostałą częścią obudowy umieszczono metalowe zawiasy i całość sklejono przy użyciu kleju. W części końcowej tego etapu pracy na drzwiczkach oraz dolnej części złącz akumulatorów umieszczono taśmę (typu rzep) dla ułatwienia montażu i demontażu złącz (rys. 14).

4. RUCH ROBOTA PO TORZE

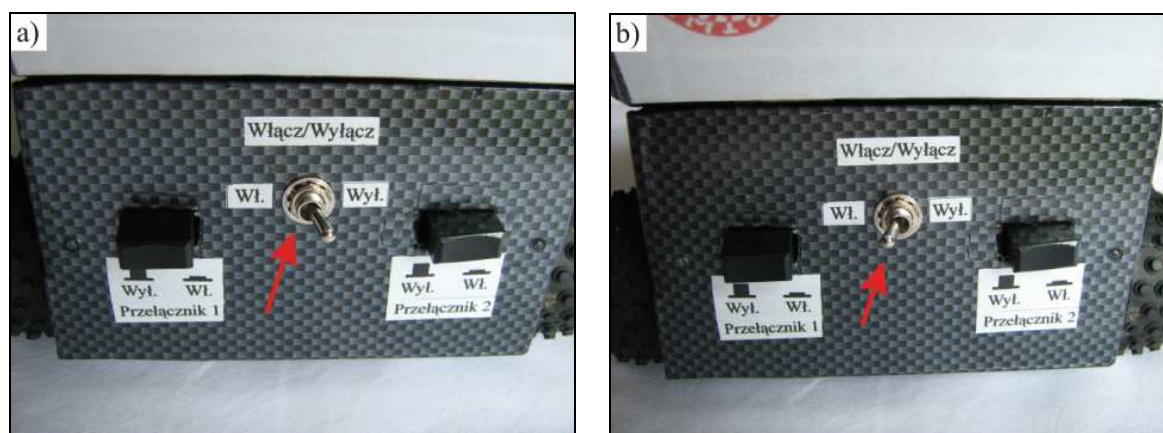
W celu uruchomienia robota należy umieścić w robocie akumulatory typu AA a następnie ustawić go na makiecie w dowolnym punkcie toru po którym będzie się poruszał (rys. 15).



Rysunek 15. Ustawienie robota mobilnego na torze

Figure 15. Position the mobile robot on the track

Następnie należy sprawdzić czy przełącznik nr 1 i 2 z tyłu robota znajdują się w pozycji wyłączonej (nie wciśniętej) oraz przestawić przełącznik włącz/wyłącz w pozycję „włącz” (rys. 16).



Rysunek 16. Włącznik zasilania robota: a) pozycja „wyłącz”, b) pozycja „włącz”

Figure 16. Power switch-key of the robot: a) the position "off", b) the position "on"

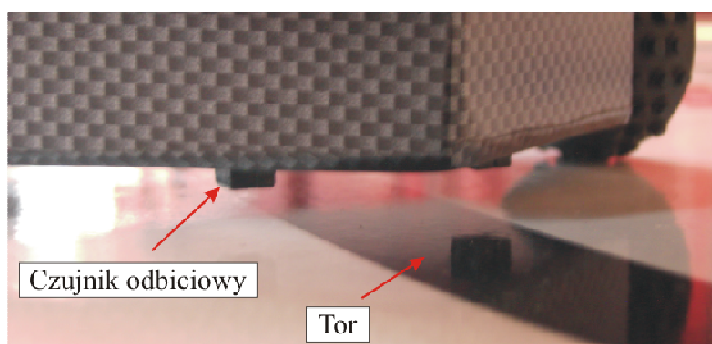
Napięcie wytwarzane przez pakiet akumulatorów nie może być mniejsze niż 5÷5,2 V w innym przypadku należy najpierw poddać akumulatory ładowaniu przy pomocy modułu fotowoltaicznego.

Zasilanie doprowadzone z pakietów akumulatorów AA poprzez przełącznik włącz/wyłącz trafia do układu sterowania. Układ sterowania przekazuje napięcie do stabilizatora oraz bezpośrednio na piny układu scalonego. Zredukowane napięcie wychodzące ze stabilizatora o wartości 5 V doprowadzone jest do pinów układu scalonego odpowiedzialnych za sterowanie logiczne oraz do czujników odbiciowych umieszczonych w podwoziu robota.

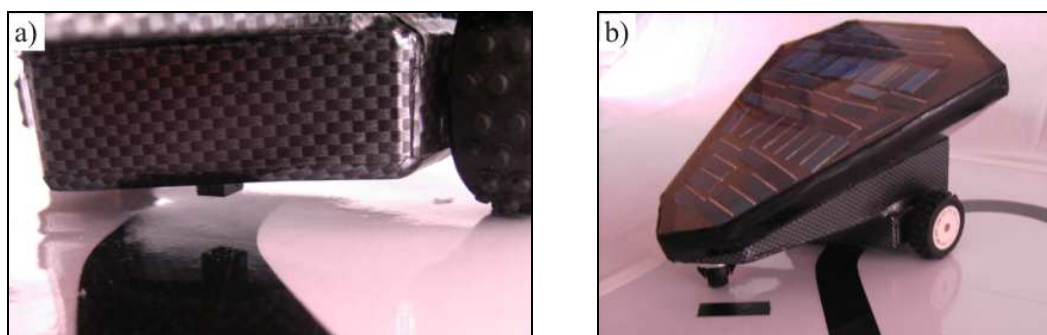
Znajdujące się w układzie scalonym kanały sterujące napędami 2 i 3 zostały na stałe zwarte (sygnał o stanie wysokim podawany na piny wejściowe) dzięki czemu na pinach wyjściowych tych kanałów pojawia się napięcie dodatnie o wartości nie zredukowanej podawanej do układu sterowania z pakietów akumulatorów.

Kanały sterujące 1 i 4 aktywowane są za pośrednictwem czujników odbiciowych. Czujniki te generują dwa stany (wysoki i niski) w zależności od położenia robota względem linii po której się porusza. W przypadku gdy linia znajduje się pomiędzy czujnikami odbiciowymi (rys. 17), promieniowanie podczerwone wysyłane przez nadajnik odbija się od białej powierzchni i trafia do odbiornika znajdującego się w czujniku.

Wówczas czujniki te przesyłają sygnał o stanie niskim do układu sterowania na piny układu scalonego powodując pojawienie się na pinach wyjściowych do napędów uziemienia. Taki stan uruchamia napędy elektryczne równomierną wartością prądu i napięcia, co powoduje prostoliniowe poruszanie się robota.



Rysunek 17. Linia pomiędzy czujnikami – ruch prostoliniowy
Figure 17. The line between the sensors – rectilinear motion



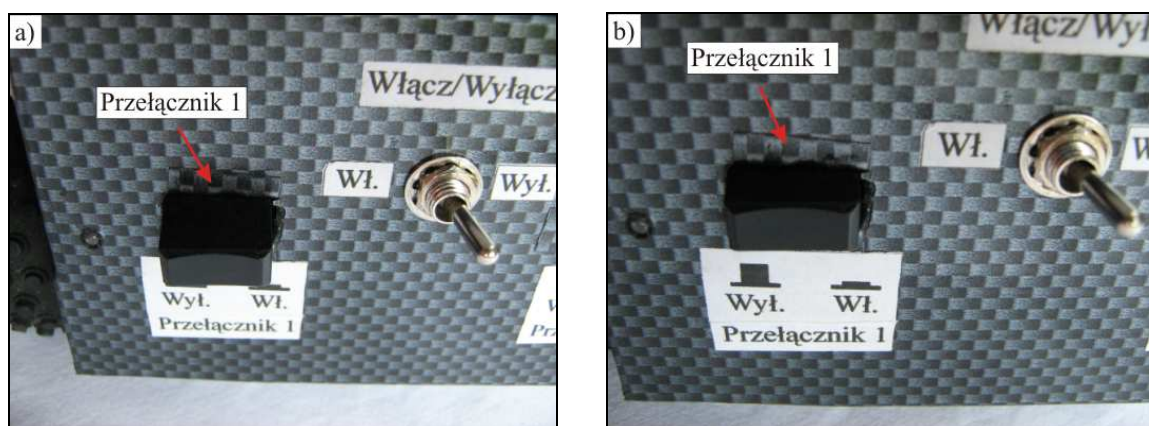
Rysunek 18. Czujnik w pozycji nad torem: a) czujnik lewy na linii, b) skręt robota w lewo
Figure 18. Sensor in a position above the track: a) sensor left on the line, b) turn the robot to the left

W przypadku gdy robot poruszając się po torze natrafi na łuk czyli jeden z czujników będzie znajdował się na czarnej linii (rys. 18) wówczas transoptor nie ma zdolności do odbicia promieni podczerwonych i nie wysyła sygnału do układu sterującego.

W takim przypadku w napędzie przypisanym do odpowiedniego czujnika brak jest zasilania i robot przy pomocy przeciwległego napędu skręca, aż do pozycji, gdy tor znajdzie się ponownie pomiędzy czujnikami.

4.1. Ładowanie akumulatorów

Ładowanie akumulatorów robota mobilnego może odbywać się w dwóch trybach wolnym oraz przyspieszonym. W celu naładowania pakietu akumulatorów należy ustawić robota w miejscu dobrze nasłonecznionym oraz płaskim. Możliwość ładowania akumulatorów zasygnalizuje dioda LED umieszczona w module, która przy odpowiednim nasłonecznieniu modułu będzie świeciła. Przed rozpoczęciem ładowania należy przestawić przełącznik włącz/wyłącz znajdujący się z tyłu robota w pozycję „wyłącz”. Następnie należy wcisnąć przełącznik nr 1 (rys. 19). Spowoduje to rozłączenie szeregowego połączenia trzech pakietów akumulatorów oraz podłączenie każdego pakietu z osobna do grup ogniw fotowoltaicznych.



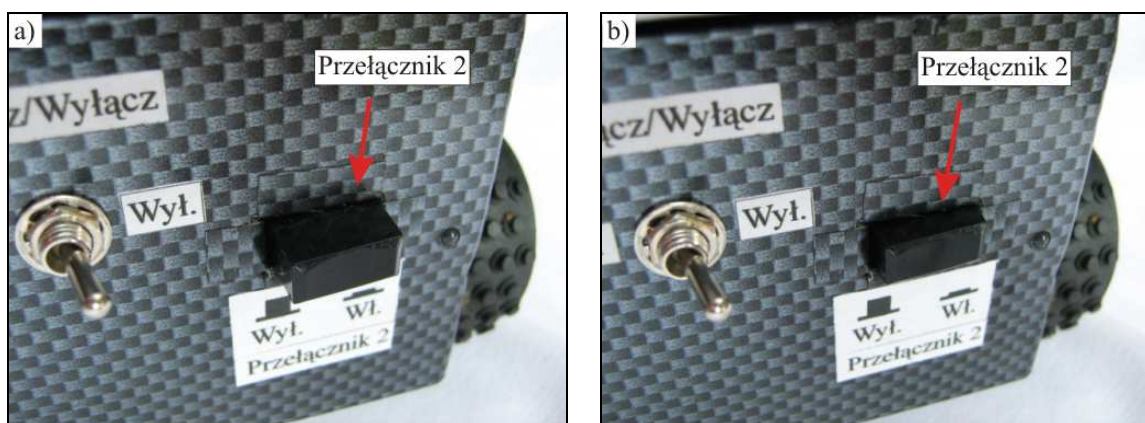
Rysunek 19. Pozycja przełącznika 1 w pozycji: a) połączenie szeregowo akumulatorów, b) ładowanie akumulatorów

Figure 19. Switch position 1 to position: a) a serial connection batteries, b) charging batteries

Prąd oraz napięcie wytworzone przez ogniwa fotowoltaiczne doprowadzane są do pakietu akumulatorów AA poprzez diodę prostowniczą, diodę Schottky’ego oraz przełącznik nr 1. Stan taki wywołuje ładowanie pakietów akumulatorów w sposób wolny i dokładny. W przypadku gdy nasłonecznienie modułu byłoby zbyt niskie, aby wytworzyć dostateczny prąd oraz napięcie do ładowania, wówczas rozładowywaniu akumulatorów zapobiegnie dioda Schottky’ego.

W celu włączenia ładowania przyspieszonego akumulatorów należy wcisnąć przełącznik 2 (rys. 20), co spowoduje równoległe podłączenie trzech grup ogniw fotowoltaicznych zwiększających prąd ładowania.

Na wyjściowych złączach (dodatnich) modułów ogniw fotowoltaicznych umieszczono diody prostownicze których zadaniem jest zapobieganie wzajemnemu oddawaniu energii pomiędzy grupami ogniw.



Rysunek 20. Przyspieszone ładowanie akumulatorów pozycja przełącznika 2: a) wyłączony, b) włączony

Figure 20. Precipitated loading batteries position of switch 2: a) turned off, b) turned on

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIAROWYCH

W ramach pracy badawczej wykonano szereg pomiarów pod obciążeniem z wykorzystaniem multimetra cyfrowego o dokładności pomiaru natężenia prądu 0,08% oraz napięcia 0,025%. Wykonane pomiary:

- natężenia prądu pobieranego przez robota podczas ruchu,
- napięcia wytwarzanego przez akumulatory po pełnym naładowaniu,
- spadku wartości napięcia akumulatorów po przejechaniu jednego okrążenia,
- ilości przejechanych okrążeń do całkowitego rozładowania akumulatorów,
- napięcia rozładowanych akumulatorów,
- czasu przejazdu jednego okrążenia,
- napięcia i natężenia prądu ładowania akumulatorów w trybie wolnym,
- napięcia i natężenia prądu ładowania akumulatorów w trybie przyspieszonym,
- czasu ładowania akumulatorów w trybie wolnym i przyspieszonym.

Robot podczas jazdy wzdłuż wyznaczonego toru pobiera natężenie oscylujące w granicach od 240 do 260 mA.

Naładowany pakiet 6 akumulatorów typu AA połączonych szeregowo, wytwarza napięcie o wartości 8,067 V (mierzone pod obciążeniem). Pojemność akumulatorów została podana przez producenta i wynosi 1300 mAh.

W tabelicy 3 zestawiono wyniki pomiarowe spadku napięcia wytwarzanego przez pakiet akumulatorów przed i po przejechaniu jednego okrążenia przez robota mobilnego.

Robot mobilny podczas przeprowadzonych kilkukrotnie badań, aż do wyczerpania akumulatorów wykonał 78 okrążeń.

Średni czas przejazdu przez robota jednego okrążenia wynosi 44 sekundy (pomiar wykonany przy pomocy stopera). W tabelicy 4 zestawiono wyniki pomiaru dziesięciu okrążeń.

Wartości napięcia oraz natężenia prądu którymi ładowane są pakiety akumulatorów zmierzono o różnych porach dnia. Pomiar wykonano przy pomocy multimetra cyfrowego podłączonego szeregowo przed złączem z akumulatorami AA (pomiar natężenia prądu) oraz połączenie równoległe do styków złącz akumulatorów AA (pomiar napięcia). Wyniki pomiaru dla trybu wolnego przedstawiono w tabelicy 5, dla trybu przyspieszonego w tabelicy 6.

Tablica 3. Spadek napięcia przypadający na jedno okrążenie

Table 3. Voltage drop attributable to a lap

| Nr okrążenia | Wartość napięcia, V | |
|--------------|---------------------|----------------|
| | Przed przejazdem | Po przejeździe |
| 1 | 8,065 | 8,048 |
| 2 | 8,048 | 8,027 |
| 3 | 8,027 | 8,001 |
| 4 | 8,001 | 7,969 |
| 5 | 7,969 | 7,941 |
| 6 | 7,941 | 7,919 |
| 7 | 7,919 | 7,896 |
| 8 | 7,896 | 7,879 |
| 9 | 7,879 | 7,854 |
| 10 | 7,854 | 7,829 |

Tablica 4. Czasy przejazdów dziesięciu okrążeń

Table 4. Times of rides of ten laps

| Nr okrążenia | Czas, s |
|--------------|---------|
| 1 | 45,12 |
| 2 | 44,10 |
| 3 | 43,97 |
| 4 | 43,56 |
| 5 | 43,79 |
| 6 | 43,59 |
| 7 | 44,20 |
| 8 | 43,98 |
| 9 | 44,03 |
| 10 | 44,13 |

Tablica 5. Napięcie i natężenie ładowania – tryb wolny

Table 5. Voltage and intensity of charging – slow mode

| Godzina pomiaru | Napięcie, V | | | Natężenie prądu, mA | | |
|-----------------|-------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| | Złącze 1 | Złącze 2 | Złącze 3 | Złącze 1 | Złącze 2 | Złącze 3 |
| 10:30 | 2,61 | 2,62 | 2,61 | 28 | 30 | 29 |
| 11:15 | 2,61 | 2,60 | 2,60 | 29 | 32 | 30 |
| 12:00 | 2,62 | 2,62 | 2,60 | 34 | 38 | 37 |
| 12:30 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 39 | 41 | 38 |
| 13:30 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 38 | 40 | 39 |
| 14:30 | 2,61 | 2,62 | 2,61 | 37 | 40 | 39 |
| 15:30 | 2,61 | 2,60 | 2,60 | 35 | 39 | 38 |
| 16:45 | 2,60 | 2,60 | 2,61 | 35 | 38 | 37 |

Tablica 6. Napięcie i natężenie ładowania – tryb przyspieszony

Table 6. Voltage and intensity of charging – accelerated mode

| Godzina pomiaru | Napięcie, V | | | Natężenie prądu, mA | | |
|-----------------|-------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| | Złącze 1 | Złącze 2 | Złącze 3 | Złącze 1 | Złącze 2 | Złącze 3 |
| 10:30 | 2,61 | 2,62 | 2,61 | 49 | 58 | 54 |
| 11:15 | 2,61 | 2,60 | 2,60 | 52 | 59 | 54 |
| 12:00 | 2,62 | 2,62 | 2,60 | 64 | 66 | 65 |
| 12:30 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 67 | 69 | 66 |
| 13:30 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 70 | 72 | 71 |
| 14:30 | 2,61 | 2,62 | 2,61 | 64 | 64 | 69 |
| 15:30 | 2,61 | 2,60 | 2,60 | 60 | 63 | 65 |
| 16:45 | 2,60 | 2,60 | 2,61 | 53 | 55 | 55 |

Czas ładowania akumulatorów w trybie wolnym wynosi od 16 do 20 godzin. Natomiast czas ładowania w trybie przyspieszonym od 8 do 12 godzin.

6. PODSUMOWANIE

Wykonane w ramach pracy studia literaturowe oraz prace manualne, obrazują szerokie zastosowanie dla ogniw fotowoltaicznych, które są przyszłością dążenia do ekologicznego i taniego pozyskiwania energii elektrycznej. Zastosowanie fotoogniw w konstrukcji robota mobilnego pozwala na długoterminową jego eksploatację uzależnioną jedynie od sposobu jego użytkowania oraz żywotności zastosowanych akumulatorów. Wykonany w ramach pracy badawczej moduł fotowoltaiczny wytwarza energię elektryczną dostateczną do naładowania akumulatorów (około $1,2 \div 1,7$ W), jednak ładowanie to jest bardzo czasochłonne oraz uzależnione od nasłonecznienia fotoogniw. Zastosowanie większej ilości ogniw fotowoltaicznych lub ogniw o większych wymiarach niesie za sobą zmniejszenie czasu poświęconego na ładowanie akumulatorów. Rozwiązanie to zwiększa koszty związane z zakupem ogniw słonecznych, lecz w niedługim okresie czasu zwracają się w postaci niższych rachunków za energię elektryczną. Wraz ze wzrostem gabarytów modułu zwiększa się również zużycie energii elektrycznej wykorzystywanej na ruch robota mobilnego.

Budowa modułu fotowoltaicznego jest najbardziej kłopotliwą częścią pracy badawczej ze względu na kruchość ogniw fotowoltaicznych oraz możliwość łatwego ich uszkodzenia, a zarazem zmniejszenia ich sprawności. Przy łączeniu ogniw fotowoltaicznych należy precyzyjnie wykonywać spoiny, aby nie uszkodzić powierzchni czynnej fotoogniwa oraz uniknąć późniejszych niesprawności wykonanych połączeń.

Wykonany robot mobilny łączy w sobie wiele dziedzin nauki m.in. elektronikę oraz fotowoltaikę przez co ma nowoczesny charakter i niespotykane dotąd rozwiązanie konstrukcyjne. Swój wyglądem oraz kształtem nawiązuje do futurystycznych pojazdów mobilnych napędzanych jedynie energią pozyskiwaną z promieni słonecznych.

LITERATURA

1. W.M. Lewandowski, Proekologiczne odnawialne źródła energii, WNT, Warszawa, 2008, 304-319.
2. M.T. Sarniak, Podstawy fotowoltaiki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.

3. J. Kamler, A. Mańk, Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie, WNT, Warszawa, 1966, 153-172.
4. A. Świt, J. Półtorak, Przyrządy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa, 1979, 1-193.
5. E. Klugmann, E. Klugmann-Radziemska, Alternatywne źródła energii, energetyka fotowoltaiczna, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok, 1999, 75-179.
6. Z. Celiński, Materiałoznawstwo elektrotechniczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005, 1-197.
7. D.W. Hamer, J.V. Biggers, Technologia układów scalonych grubowarstwowych, WNT, Warszawa, 1976.
8. K. Waczyński, E. Wróbel, Elektroniczne przyrządy półprzewodnikowe. Zasady działania diod i tranzystorów – rozwiązywanie zadań, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
9. L.A. Dobrzański, P. Panek, A. Drygała, M. Musztyfaga, Właściwości elektryczne i optyczne fotoogniw wytworzonych z wykorzystaniem metody sitodruku, Elektronika 5 (2010) 63-65.