

Turbina wiatrowa

a) Dobór generatora

Najczęściej budowę prądnicy do elektrowni wiatrowej w warunkach amatorskich poprzedza konieczność wyboru między dwoma zasadniczymi rozwiązaniami:

- prądnica tzw. pralkowiec - przerobiony silnik od pralki, lub silnik podobnego typu
- prądnica tzw. amerykanka (zrobić).

Są to rozwiązania dobre dla generatorów dużej mocy (kW) i wydajności

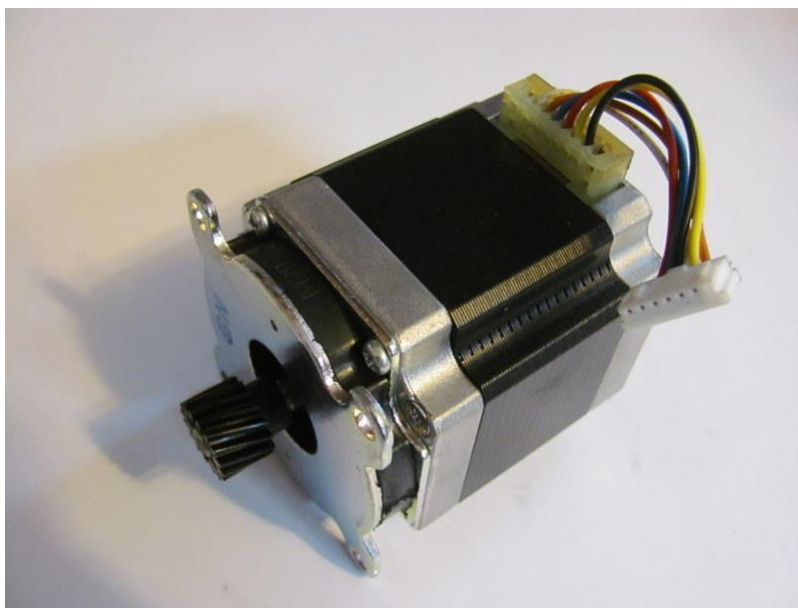
W tym przypadku jest potrzeba prądnicy która spełni następujące kryteria

- wolnobieżność aby uniknąć niepotrzebnych komplikacji mechanicznych (przekładnie)
- prądnica w którą nie trzeba będzie ingerować (np. przezwajanie)
- brak obsługi (np. wymiana szczotek)

Najlepszym wyborem okazało użycie silnika krokowego w dość nietypowej roli generatora. Silniki krokowe przekształcają impulsy elektryczne w ruchy mechaniczne. Każdy impuls podany na uzwojenia silnika powoduje obrót wirnika o niewielki kąt. W naszym przypadku każdy obrót wirnika wyindukuje w uzwojeniach stojana napięcie.

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none">- Silniki krokowe są przystosowane do wykonywania od ułamków obrotu na minutę do kilkuset obrotów na minutę dzięki czemu można zbudować prądnice wolnoobrotową co upraszcza mechanikę turbiny- Bezobsługowość (brak komutatora)	<ul style="list-style-type: none">- Niska sprawność (normalnie nie przewidziane do pracy generatorowej)- Wysoka jak na generator rezystancja uzwojeń stojana ($0,84\Omega$)

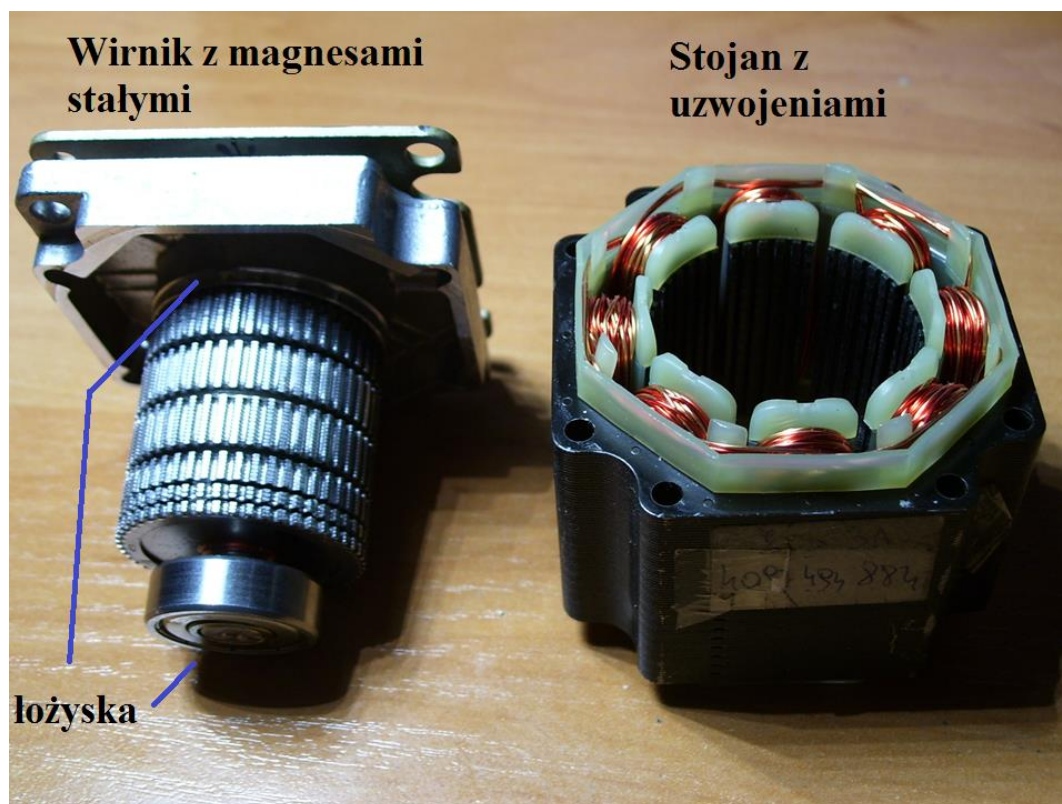
b) Dane techniczne i budowa silnika krokowego



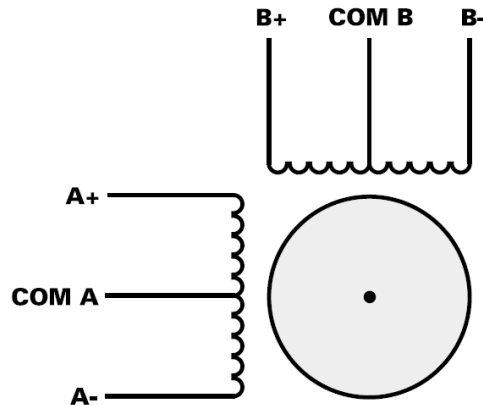
Dane techniczne

- prąd 2,5 A
- 1,8 step
- wyprowadzenie 6 prz.
- długość korpusu 53 mm
- szer/wys 56 mm
- długość całości 78 mm
- średnica osi 6 mm
- średnica zębátky 15 mm
- waga 0,72 kg

Zastosowany silnik 103H7123-0666 firmy SANYO DENKI



Budowa wewnętrzna silnika krokowego



Układ połączenia zastosowanego silnika krokowego 6-przewodowego

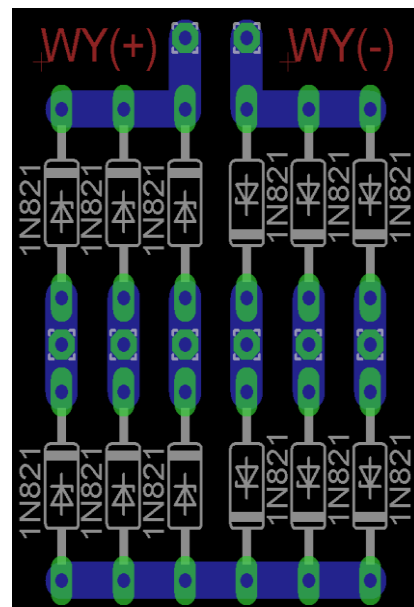
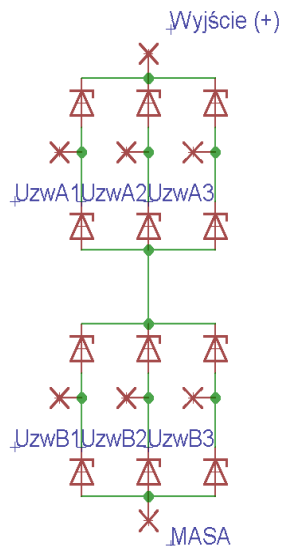
c) Układ prostujący

Jak widać powyżej silnik posiada sześć wyprowadzeń z dwóch uzwojeń. Napięcia na każdym z kolejnych wyprowadzeń przesunięte są względem siebie o taki sam kąt. Do wyprostowania napięcia zastosowano:

- Dwa trójfazowe mostki prostownicze połączone w szereg
- Zastosowane diody Schottkiego 1N5819 dla zaoszczędzenia strat mocy oraz niskiego spadku napięcia

Wybrane dane techniczne diody

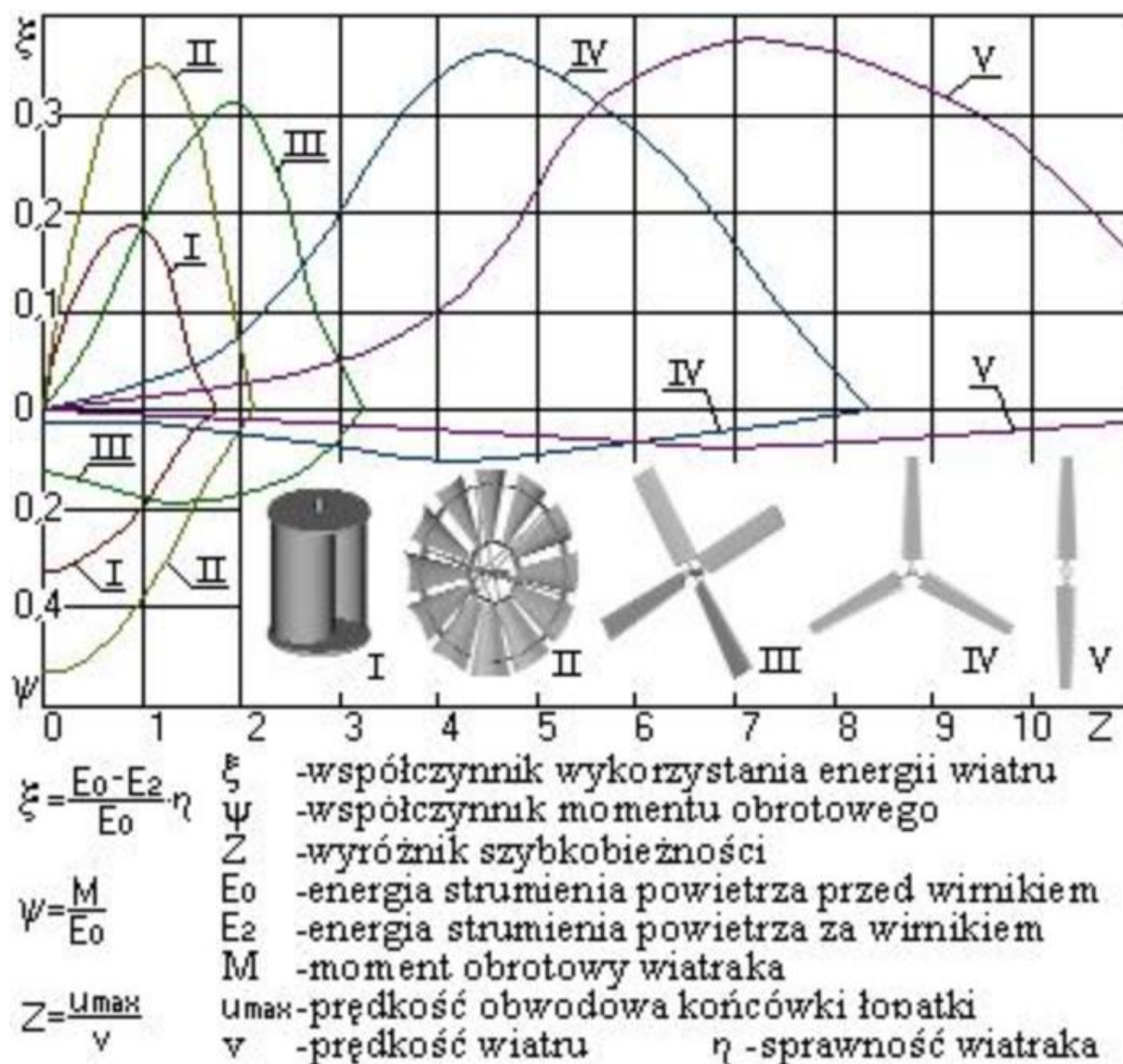
1N5819: VRRM: 40V, IF(av): 1A, VF: ok. 0.43V @ 500mA



Układ mostków prostowniczych oraz PCB

d) Budowa wirnika i łopat

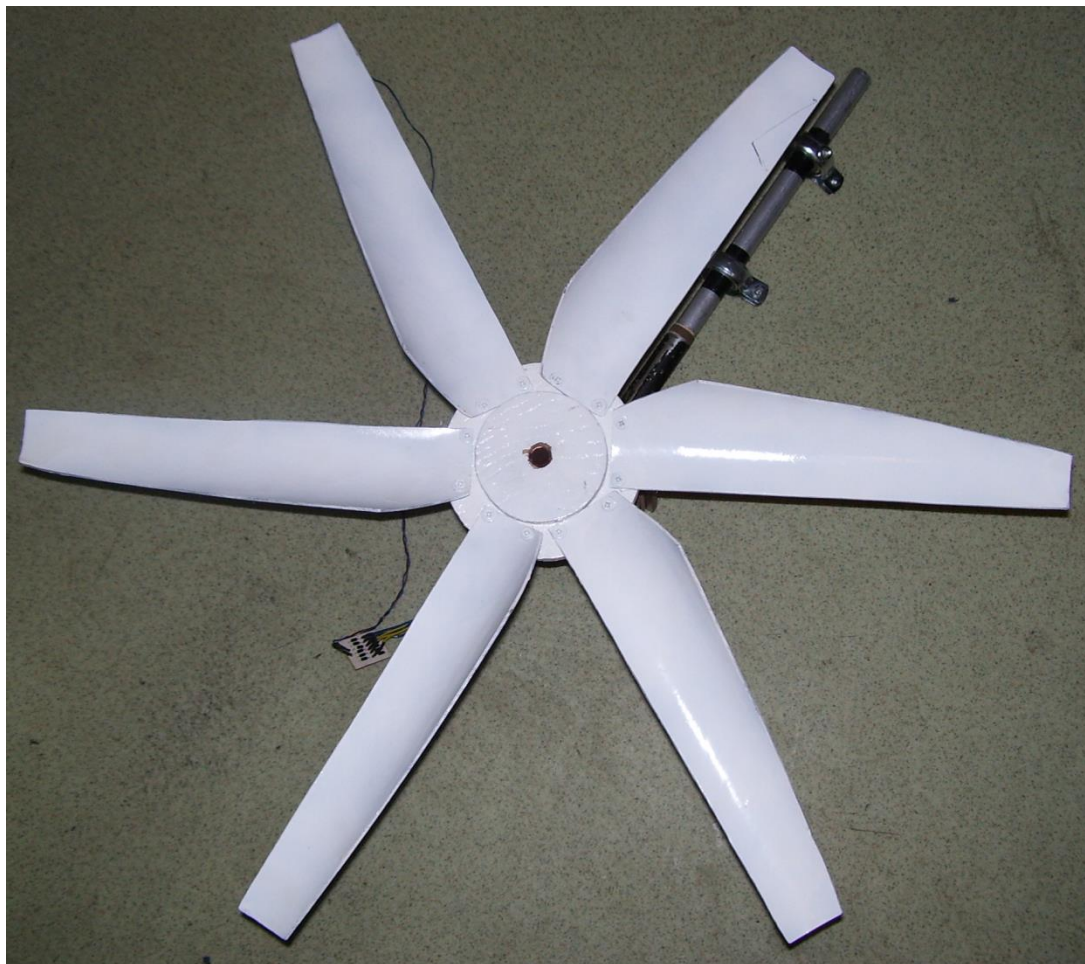
Wiatraki wolnobieżne wyróżniają się od innych wiatraków tym że posiadają większą ilość łopatek. Zaletą dużej ilości łopat jest duży moment rozruchowy (co widać na Rys. 1.1 parametr Ψ) oraz niewielka prędkość obrotowa łopatek. Ze względu na dużą ilość łopat startują już przy nie wielkim wietrze (duża powierzchnia natarcia dla wiatru), natomiast słabo wykorzystują dużą prędkość wiatru co jest ich wadą (co widać na Rys. 1.1 parametr ξ). Ze względu na duży moment rozruchowy silniki te nadają się do napędu maszyn o znacznym momencie obrotowym.



Rys. 1.1 Krzywe dla różnych typów wirników

Jeśli na skutek wzrostu szybkości wiatru moment silnika wiatrowego się powiększy, to ten wzrost jego mocy ujawni się przede wszystkim w zwiększeniu się jego szybkości obrotowej. Ponieważ zaś w miarę zwiększania się szybkości obrotowej silnika jego moment obrotowy maleje, to silnik zwiększy swe szybkości obrotowe aż do zrównoważenia swego momentu obrotowego z momentem obciążeniowym.

Gdy natomiast z jakichkolwiek przyczyn zwiększy się moment obciążeniowy, albo też, co na jedno wychodzi, moment obrotowy silnika się zmniejszy, to silnik wiatrowy zmniejszy przede wszystkim swą szybkość obrotową. Ponieważ w miarę zmniejszania szybkości silnika jego moment obrotowy wzrasta, to silnik będzie zmniejszał szybkość obrotową, aż jego moment obrotowy zrównoważy się z momentem obciążeniowym.



Wielołopatowy wirnik turbiny wiatrowej

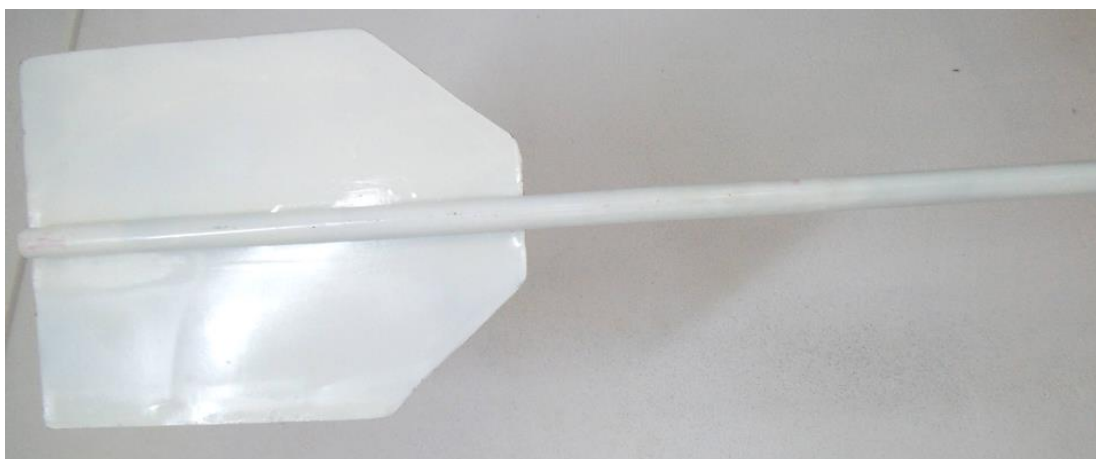
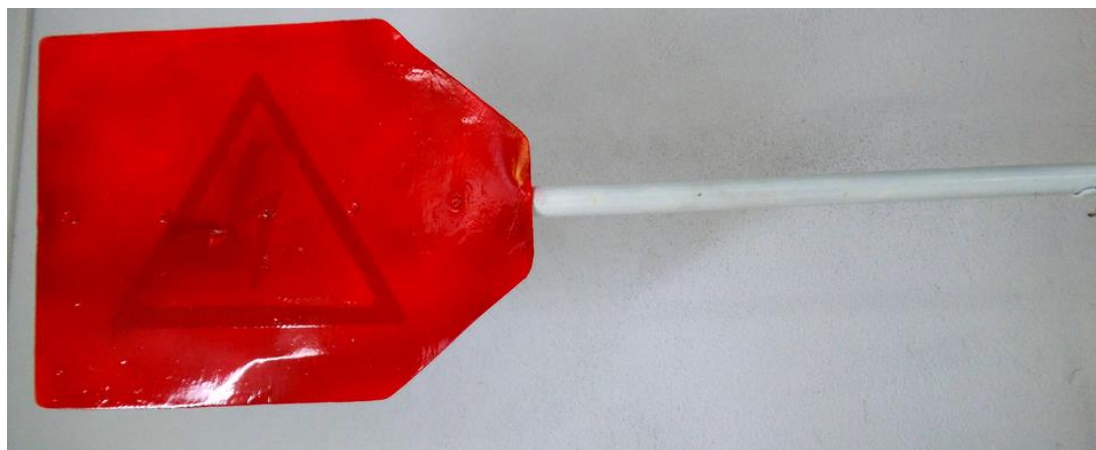
Można więc stwierdzić, że praca wielołopatkowego silnika wiatrowego z maszyną produkcyjną o stałym momencie obciążeniowym jest stateczna. Wielołopatkowy silnik wiatrowy nawet przeciążony będzie w dalszym ciągu pracował, zmniejszając tylko swą szybkość obrotową oraz współczynnik wykorzystania energii wiatru, czyli swą sprawność.

Łopaty wykonane są z rury PCV fi 100, długość łopaty to 32cm. PCV jest wrażliwe na promienie UV oraz ciepło dlatego całość została pokryta białym lakierem.

e) Ster tylny

Nastawianie koła wiatrowego pod wiatr dokonuje się sterem tylnym, wykonanym z blachy stalowej.

Przy wykonywaniu stery należało dobrać długość ramienia tak aby zrównoważyć ciężar śmigła



f) Sprzęgło

Osiowe parcie wiatru w wiatrowych silnikach wielołopatkowych jest największe podczas rozruchu i w miarę zwiększania szybkości obrotowej prędko maleje.

Aby nie przenosić nie potrzebnych sił parcia oraz sił poziomych na wirnik silnika zostały zastosowane dodatkowe dwa łożyska kulowe. Siły te mogły by spowodować uszkodzenie delikatnych łożysk silnika krokowego.



Widok sprzęgła śmigło – wirnik silnika

Zastosowane łożyska są średnicy wewnętrznej fi 15. Wał wykonany jest z rurki miedzianej fi 15 używanej w instalacjach wodociągowych. Łożyska oraz śmigło zostały wbite na wcisk.

Sprzęgło z węża ogrodowego doskonale przenosi moment obrotowy oraz eliminuje wszelkie drgania spowodowane niedoskonałością konstrukcji.

g) Łożyska

Zastosowane łożyska kulkowe przejmują siły promieniowe i osiowe, mogą być także stosowane przy dużych prędkościach obrotowych. Ponadto wykazują nieznaczne tarcie, mogą być wykonane z bardzo dużą dokładnością, oraz mogą być stosowane jako rozwiązania cichobieżne. Łożyska uszczelnione z obu stron są wypełnione zwykle smarem na bazie litu, który wykazuje dobre właściwości antykorozyjne i może być stosowany w przedziale temperatur od 30°C do +110°C. Łożyska są smarowane na cały okres ich trwałości i nie

wymagają dozoru. Ilość smaru jest dostosowywana każdorazowo do wielkości łożyska i wypełnia w większości przypadków od 25 do 35% wolnej przestrzeni łożyska.

Łożyska zostały osadzone na uchwytych do rur o średnicy 1 cala.



Zestaw łożysk jednorzędowych uszczelnionych obustronnie blaszkami o różnych średnicach wewnętrznych, zewnętrznych oraz szerokości.

Pierścień ślizgowy

Pierścień ślizgowy zapewnia ruchomy kontakt elektryczny pozwalający na przepływ prądu z części nieruchomej do wirującej. Pierścienie ślizgowe wykonane są z materiałów odpornych na ścieranie, ale przeważnie z wysoką zawartością miedzi celem zmniejszenia oporu elektrycznego.

W przeciwieństwie do komutatora pierścień nie ma przerw i jest jednolity na całym obwodzie. Po pierścieniu porusza się szczotka elektryczna zapewniająca odpowiedni kontakt elektryczny i przepływ prądu. [1]

W zależności od wymagań konstrukcyjnych szczotka może być wykonana ze stopu metali (np. z dużą zawartością miedzi w celu uzyskania niewielkiej rezystancji) lub odpowiednio spreparowanego grafitu odpornego na ścieranie.

Szczotki wymagają stałego docisku, którego siła jest z góry określona dla konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego. Zbyt słaby docisk skutkuje nadmiernym iskrzeniem (dla dużych prądów spowodowanym łukiem elektrycznym) i przyspieszonym wypalaniem miejsca

kontaktu. Zbyt silny docisk powoduje zwiększone straty mocy na tarcie mechaniczne oraz szybsze ścieranie kontaktów.

Docisk jest zazwyczaj zapewniony przez użycie odpowiednio zaprojektowanych sprężyn. W miarę użytkowania urządzenia następuje ścieranie szczotek, które są ciągle dociskane do miejsca kontaktu. Zachodzi więc konieczność elastycznego połączenia elektrycznego pomiędzy samą szczotką oraz resztą układu doprowadzającego lub odprowadzającego prąd elektryczny. W tym celu zazwyczaj stosuje się splecioną linkę miedzianą umożliwiającą swobodne przesuwanie szczotek. [2]

A) Lakierowanie

Wszystkie elementy konstrukcyjne metalowe zostały odpowiednio zabezpieczone przed korozją. Ważne jest, aby dokładnie oczyścić powierzchnię przed malowaniem. W ten sposób powierzchnia będzie dłużej odporna na zniszczenie i zużycie.

Na początku powierzchnie zostały dokładnie oszlifowane aby usunąć korozję oraz ewentualny stary lakier. Do wypełnienia zagłębień i przetarć użyto szpachli samochodowej.

Następnie usunięty został tłuszcz i brud. Do tego celu został użyty rozpuszczalnik.

Po wyczyszczeniu powierzchni została nałożona warstwa szarego lakieru podkładowego antykorozyjnego.



2. Ogniwo fotowoltaiczne

Pierwsze panele słoneczne polikrystaliczne, zostały wprowadzone na rynek w roku 1981. Surowy krzemu topi się i wlewa do formy kwadratowej, który jest chłodzony i cięty na płytkach całkowicie kwadratowych. Jest to jedna z cech ogniw polikrystalicznych. Przyleganie ogniw w panelu uwarunkowane jest ich budową. Jeżeli przyjrzymy się ogniwom poli i monokrystalicznym zauważymy, że: ogniwa monokrystaliczne nigdy nie są kwadratowe, lecz ich rogi zawsze są ścięte. Natomiast ogniwa polikrystaliczne są zawsze regularnymi kwadratami.

Zalety

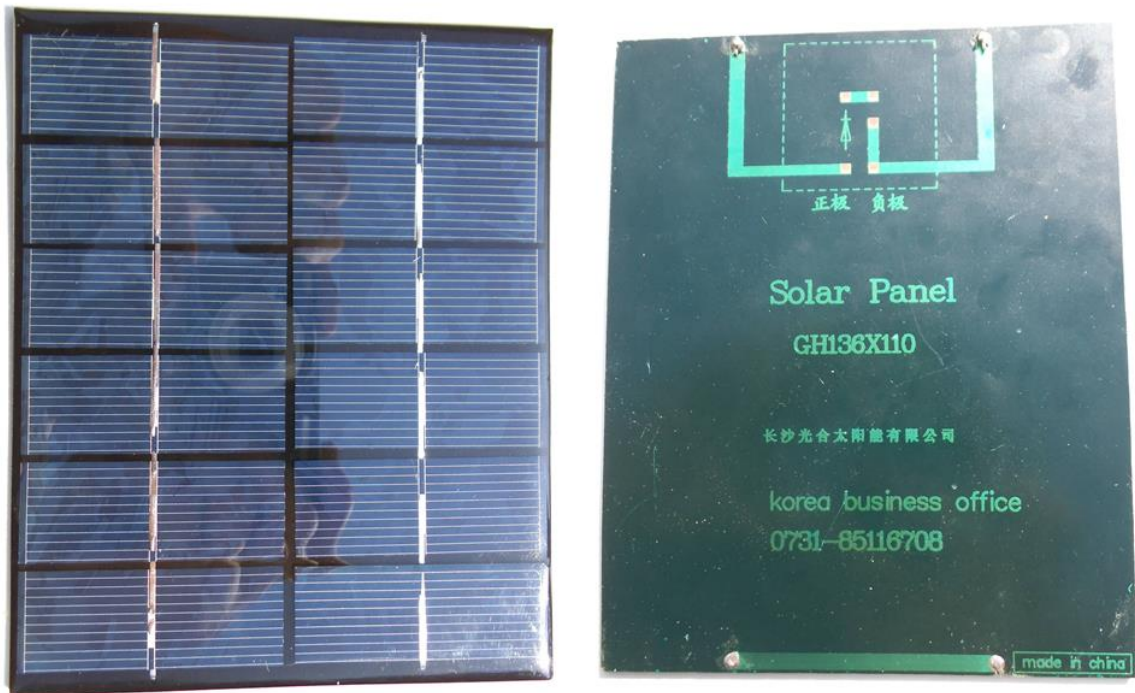
- Proces używany do produkcji polikrystalicznego krzemu jest prostszy i koszty są mniejsze. Ilość krzemu odrzuconego w procesie technologicznym (odpady) jest mniejsza w porównaniu z panelami monokrystalicznymi.
- Pomimo mniejszych kosztów sprawność polikrystalicznych paneli słonecznych w przypadku gdy działają na nie wysokie temperatury jest niewiele mniejsza od monokrystalicznych i zazwyczaj nie jest brana pod uwagę.

Wady

- Sprawność polikrystalicznych paneli słonecznych to zazwyczaj 13-16%. Z powodu mniejszej czystości krzemu, polikrystaliczne panele słoneczne nie są tak skuteczne jak monokrystaliczne.
- Zazwyczaj trzeba pokryć większą powierzchnię do produkcji takiej samej mocy elektrycznej jak w przypadku kolektorów słonecznych wykonane z monokryształów krzemu.

Im bardziej intensywnie jest światło to ogniwo solarne generuje więcej prądu elektrycznego, a w związku z tym ogniwa zwiększają swoją wydajność. W godzinach porannych i wieczornych, przy zachmurzonym niebie lub podczas mgły wydajność jest wprawdzie niższa, ale prąd produkowany jest nieprzerwanie, ponieważ ogniwo produkuje energię przy naświetlaniu światłem rozproszonym. Panele fotowoltaiczne mają wyższą wydajność przy niższych temperaturach niż w pełnym słońcu.

Szczytowa moc panelu solarnego podawana jest w jednostce watt peak (z języka angielskiego „peak = szczyt”) i oznaczona jest symbolem małej litery „p” za danymi podanymi w jednostce wat lub kilowat (Wp, kWp). Wartość ta oznacza moc, którą panele fotowoltaiczne osiągają w pełnym słońcu i przy zdefiniowanych warunkach testowych. Peak lub moc szczytowa często oznaczana jest jako „wartość nominalna” lub też „m



Przód i tył zastosowanego ogniwa, wymiary ogniwa wymiary 136x110x3mm

3. Nadażność panelu za słońcem – mechanika

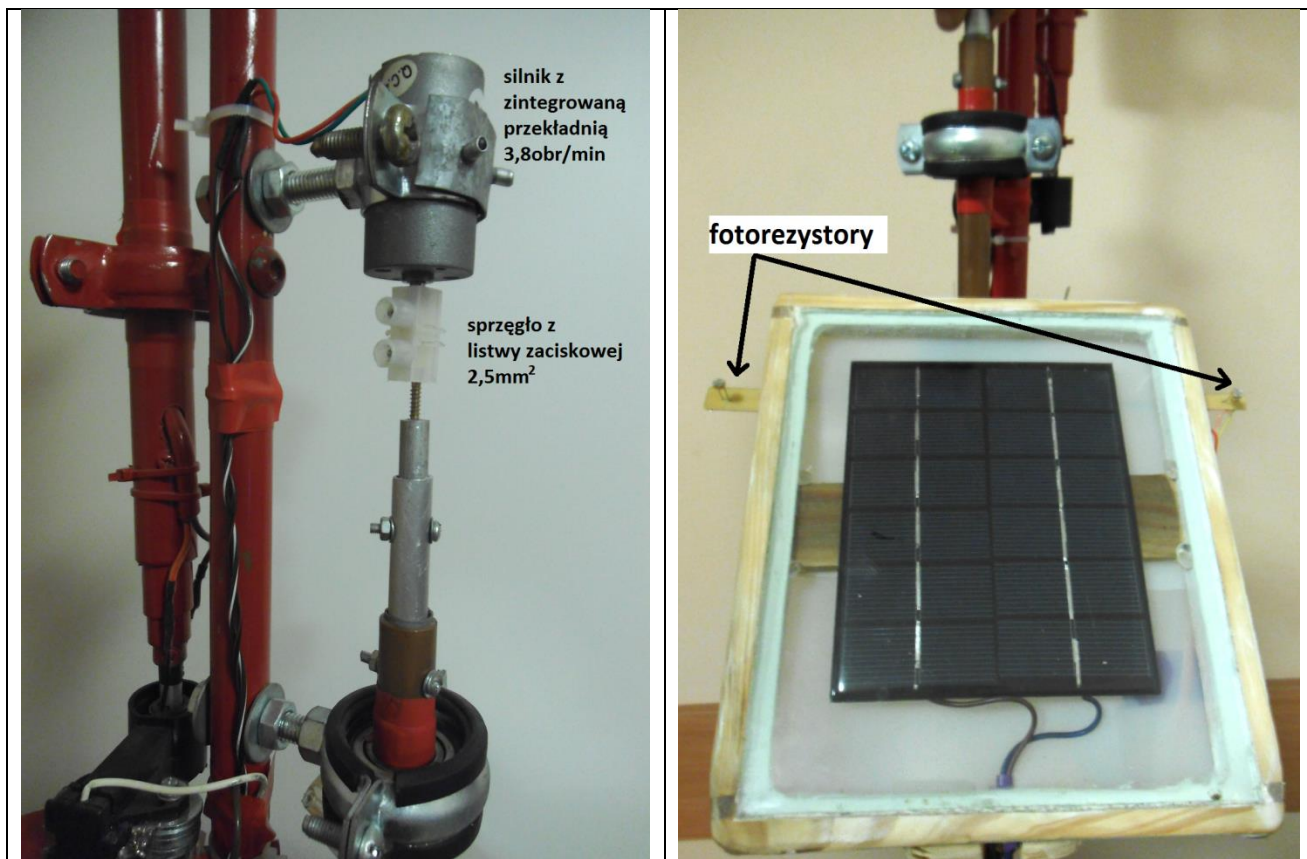
Do obrotu wałem wykorzystany został mały silniczek DC z wbudowaną przekładnią o redukcji 610-krotnej (Typ SG-27123000-610k). Wał wyjściowy znajduje się na środku frontu silnika, mimo że przekładnia nie jest konstrukcji planetarnej. Nominalnie napięcie znamionowe twornika wynosi 12 V prądu stałego, ale silnik pracuje już od 2 V przy obu biegunowościach, czyli już od ok. 0,7 obrotów na minutę.

Dla 12V prędkość znamionowa wynosi 3,8 obr/min przy prądzie 20 mA, z obciążeniem 25 N/cm. Przy zasilaniu 3V pobór prądu wynosi w pomiędzy 5-7mA. Oś o średnicy 4 mm, długość korpusu 46 mm razem z reduktorem, średnica 27 mm. Większość kół przekładni jest ze stali.

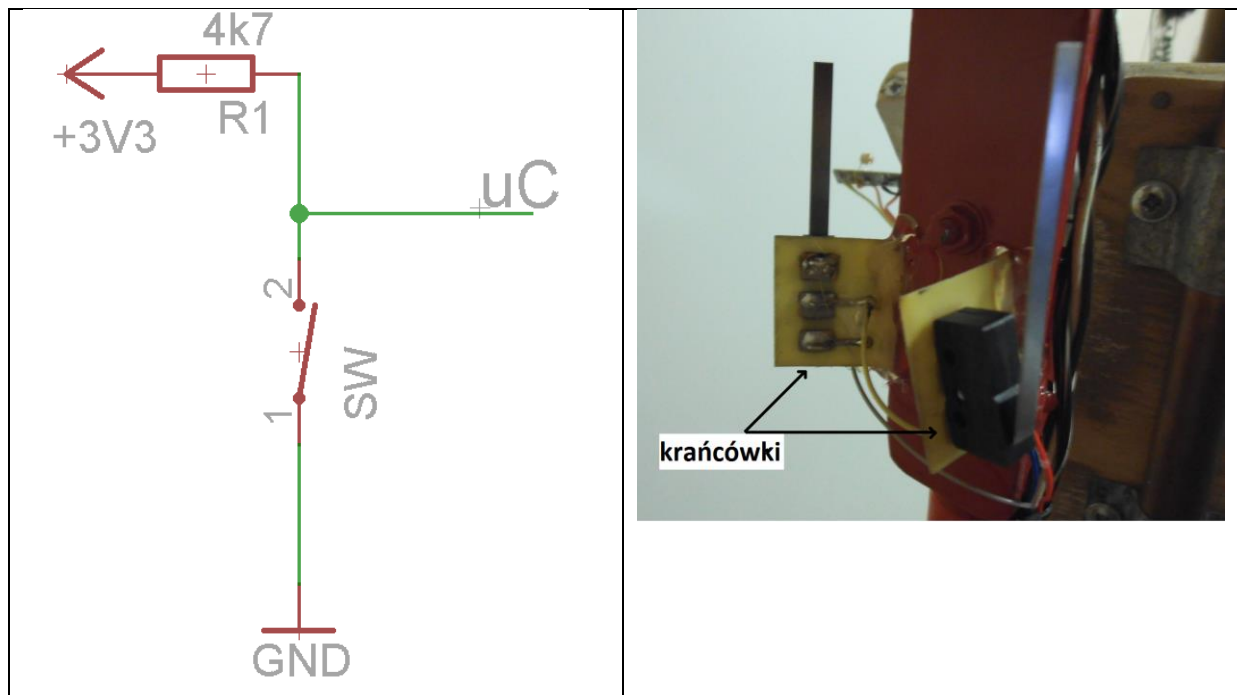
Silnik sterowany jest przez mostek H którego konstrukcja i sterowanie zostały opisane w dziele z układami elektronicznymi.

Wał silnika sprzęgnięty jest z wałem na którym znajduje się ogniwo fotowoltaiczne poprzez listwę zaciskową na przewód 2,5mm², taką jak używa się w instalacjach elektrycznych. Wał z ogniwem zamocowany jest na dwóch łożyskach.

Po bokach ogniwa zostały zamocowane fotorezystory.



Układ elektroniczny nie wie w jakim położeniu znajduje się aktualnie wał z ogniwem. Do wału nie jest zamontowany np. enkoder który pracował by w sprzężeniu zwrotnym z elektroniką. Przez to mogło by dojść do sytuacji że wał z ogniwem zacznie dobijać do swojego skrajnego położenia. Mogło by to doprowadzić do ukręcenia wału lub spalenia twornika albo komutatora. Należy zatem przesłać informacje do układu elektronicznego o momencie kiedy panel będzie zbliżał się do swojego skrajnego położenia. Realizowane jest to za pomocą łączników dźwigniowych, pełniących role krańcówek.



Łącznik krańcowy jest podpięty z jednej strony pod masę, a z drugiej przez resystor podciągający 4,7k do 3,3V. Jeśli panel dobije do końca załączy łącznik co spowoduje sprowadzenie pinu mikrokontrolera do masy.

2. Układy elektroniczne (sekcja zasilania)

układ ładowania
pomiar param. ogniwa
stabilizator 3,3V z komparatorem

pomiar prądu wiatraka
MAX9611

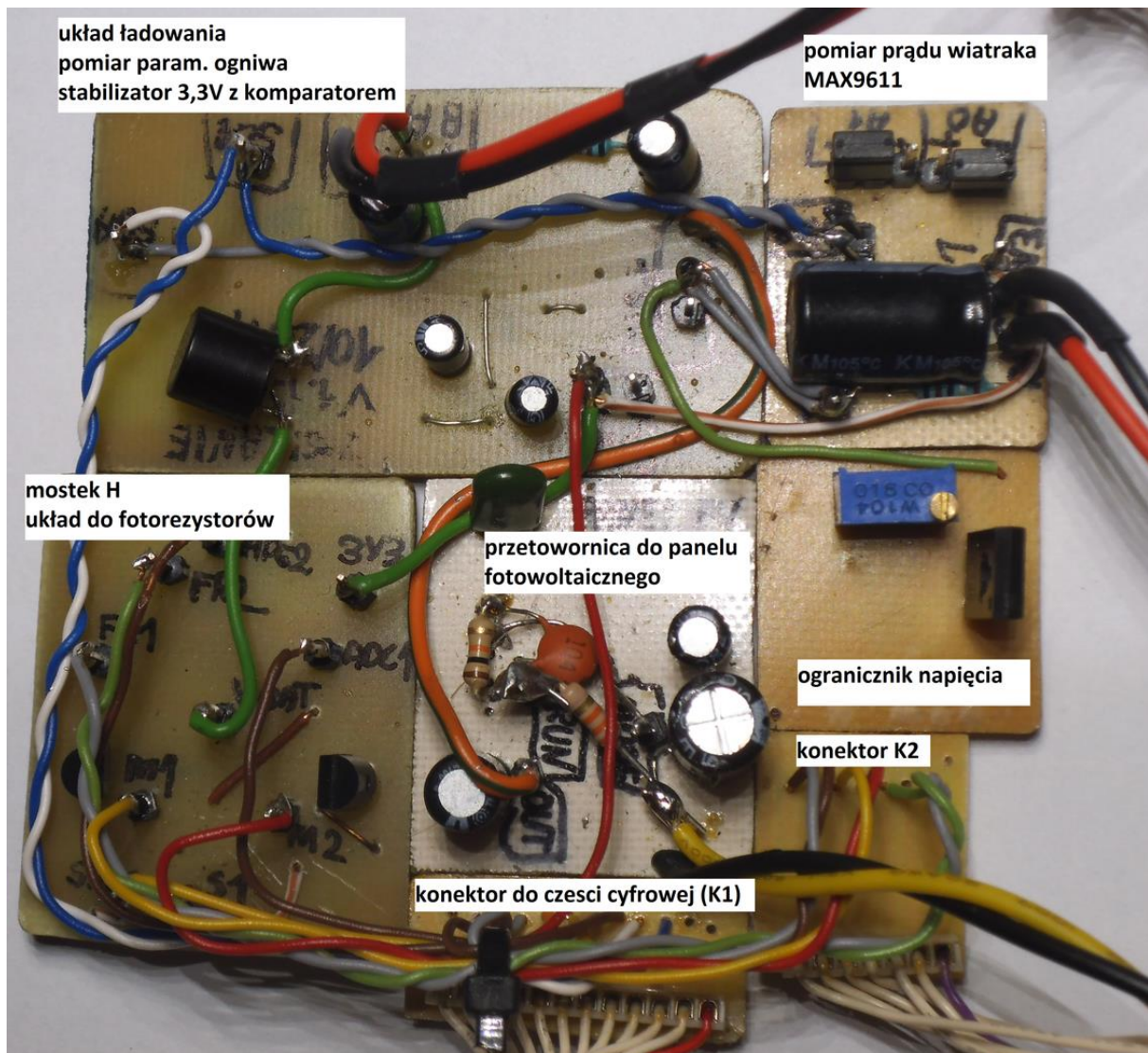
mostek H
układ do fotorezystorów

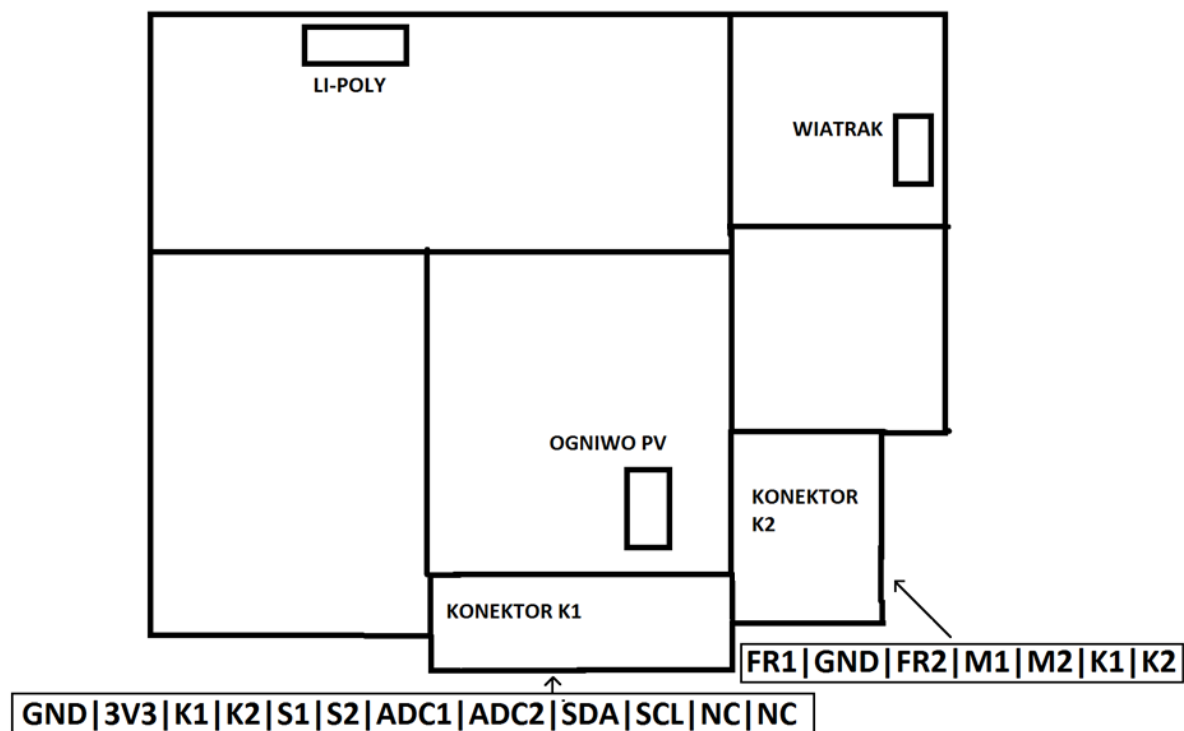
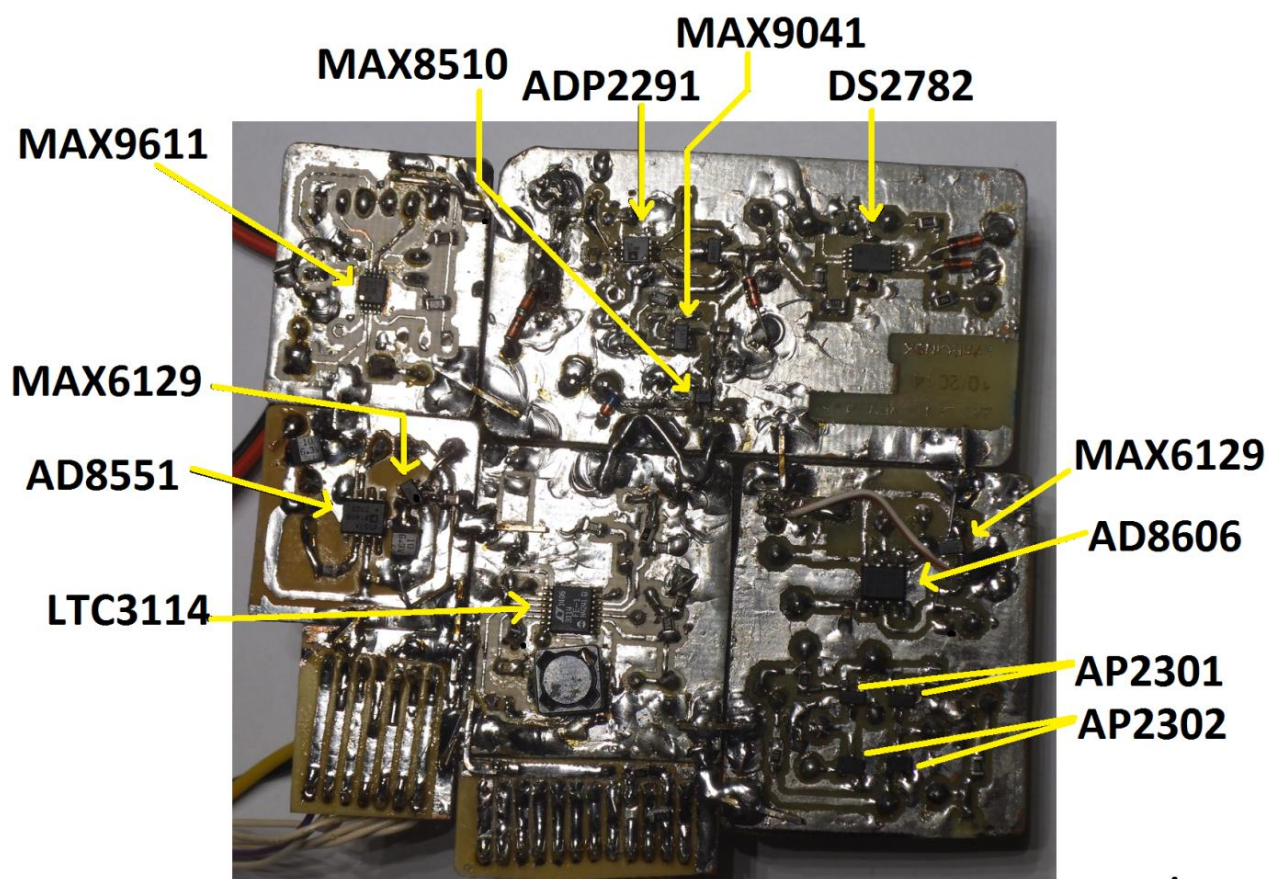
przetwornica do panelu
fotowoltaicznego

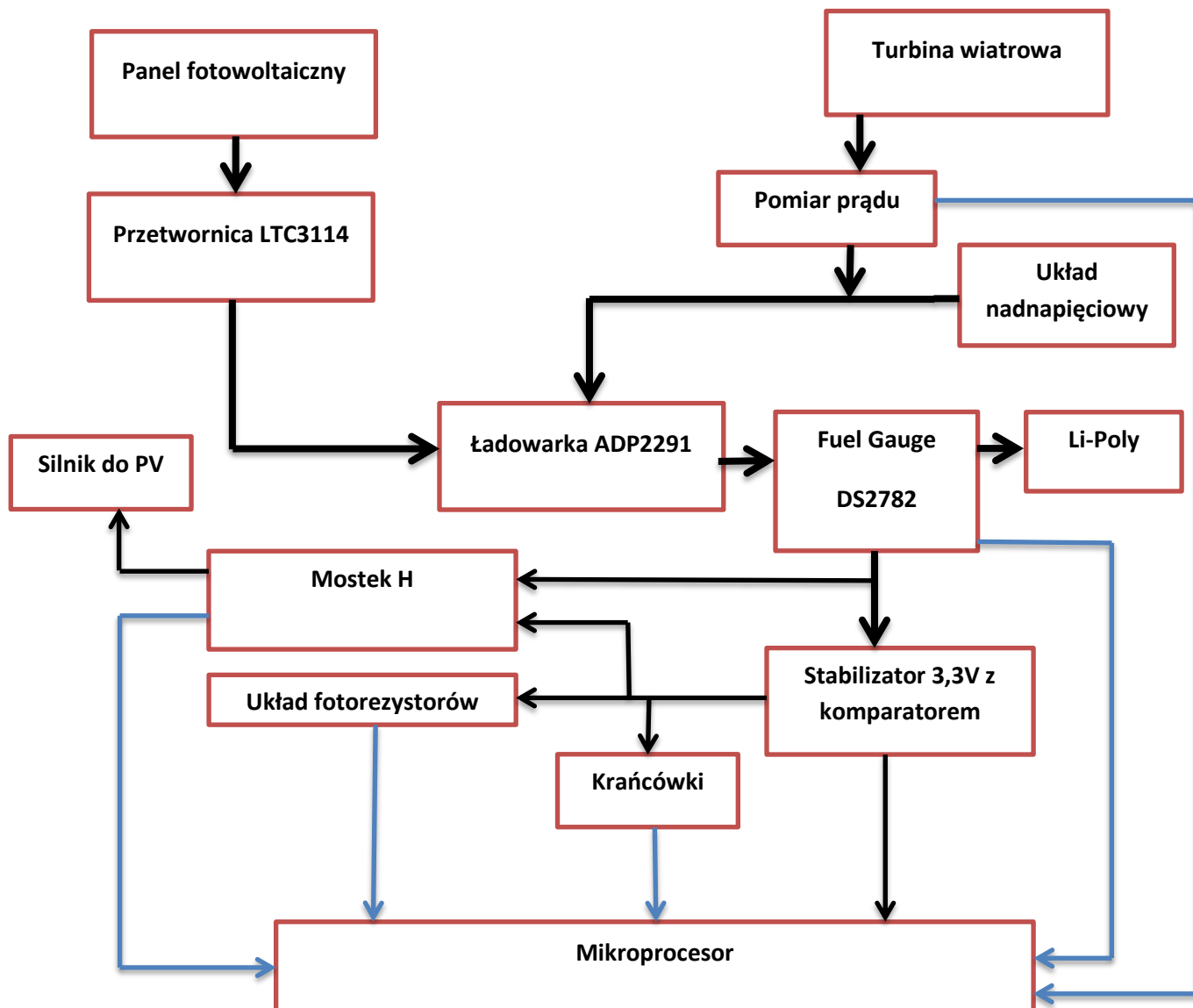
ogranicznik napięcia

konektor K2

konektor do części cyfrowej (K1)



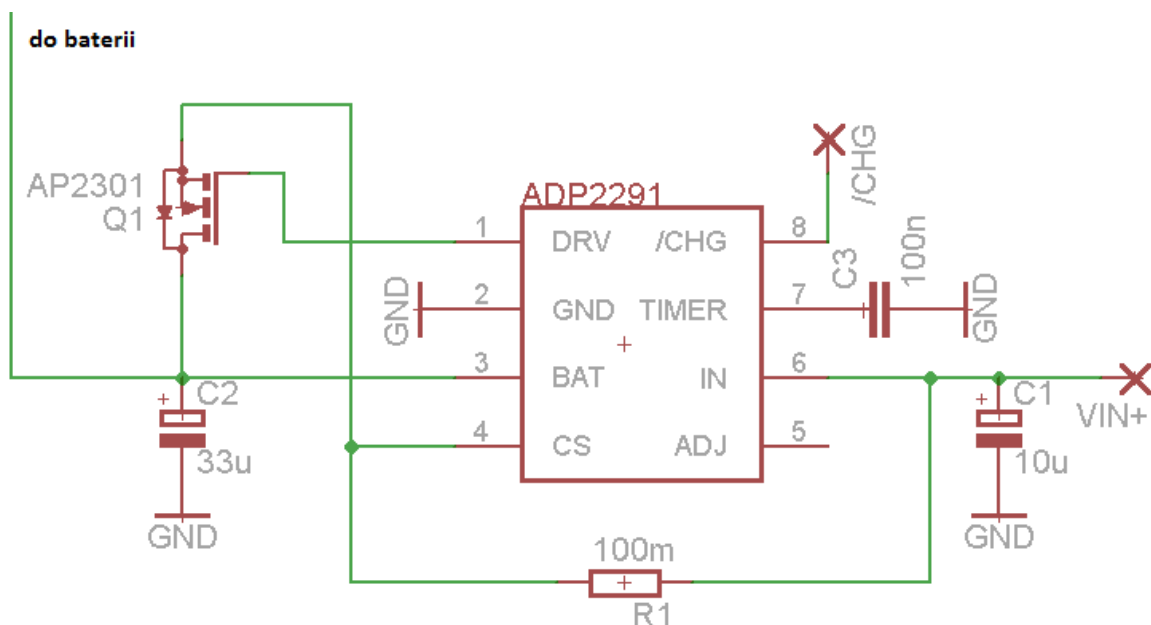




a) Układ ładowania akumulatora Li-Poly – ADP2291

Ładowanie akumulatora zostało oparte na układzie ADP2291 firmy Analog Devices. Układ dostępny jest w przyjaznej 8-nóżkowej obudowie MSOP. Algorytm oparty jest na metodzie ładowania stałym prądem/stałym napięciem. Może ładować maksymalnie jedno ogniwo na raz. Jest to ładowarka liniowa zaprojektowana specjalnie do urządzeń mobilnych oraz w aplikacjach wymagających dużej integracji elementów. Napięcia wejściowe są z zakresu 4.5V do 12V. Ładowarka posiada również sygnalizację ładowania (wyjście CHG/) ale nie jest używane w tej aplikacji.

W przypadku gdy ładowarka wykryje brak napięcia wejściowego prąd spoczynkowy pobierany z baterii jest poniżej 1uA

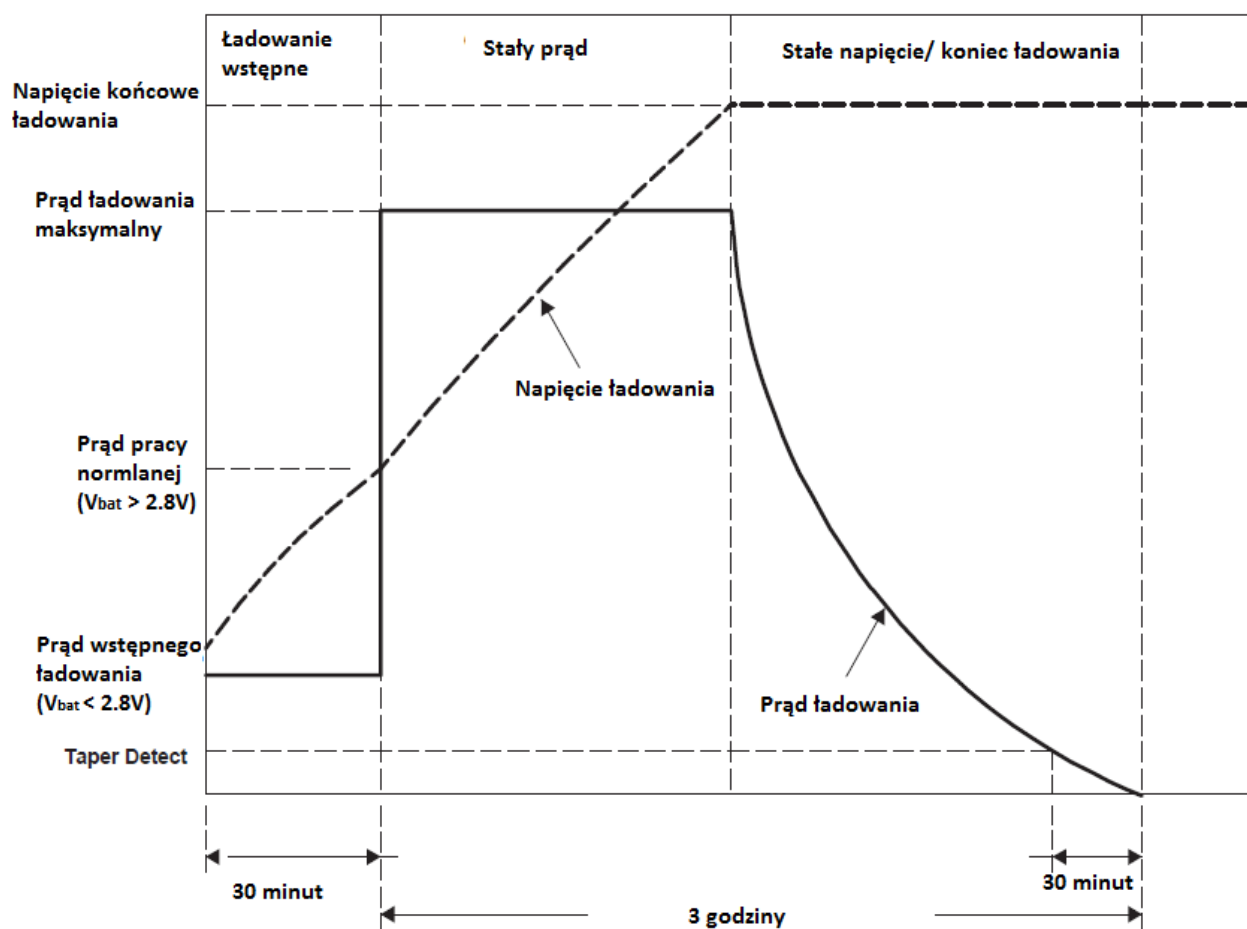


Schemat ideowy ładowarki

Aby zapewnić poprawne działanie ładowarka posiada wewnętrzny komparator podnapięciowy. Jeśli napięcie wejściowe spadnie poniżej 3.8V ładowarka wyłączy się. Jeśli napięcie to zostanie przekroczone układ AD2291 sprawdza różnicę napięć między baterią i napięciem wejściowym. Jeśli $U_{wy} \geq U_{bat} + 165mV$ ładowarka już rozpoczyna ładowanie.

Elementem wykonawczym jest tutaj tranzystor N-MOSFET AP2301. Tranzystor ten ma niskie $R_{DS(on)}$ (97mΩ) oraz otwiera się do pełna przy niskim V_{GS} dzięki temu jest idealny do tej aplikacji. Niskie $R_{DS(on)}$ powoduje że straty na tranzystorze są minimalne oraz różnica napięć między wejściem a baterią nie musi być wysoka, co jest ważne gdyż jest to ładowarka liniowa.

Aby osiągnąć jak największą żywotność baterii oraz aby metoda ładowania była bezpieczna ładowania odbywa się w cyklach.



- ładowanie wstępne

Dla głęboko rozładowanych ogniw których napięcie wynosi $V_{bat} < 2,8V$ rozpoczyna się faza ładowania wstępnego. Zależnie od ustawienia rezystancji pinu ADJ jest ona różna ($ADJ=3V$ $I_{pre}=I_{max}/10$, $ADJ=1,5V$ $I_{pre}=I_{max}/5$). W naszym przypadku wynosi $I_{pre}=150mA$.

Jeśli napięcie baterii po 30 min. Nie osiągnie wartości powyżej 2.8V, ładowarka wchodzi w stan awaryjny co skutkuje przerwaniem ładowania. Może ono zostać wznowione po wyjęciu i ponownym włożeniu akumulatora.

- praca normalna

Podczas normalnej pracy ($V_{bat}>2,8V$) ogniwo ładowane jest prądem maksymalnym I_{max} . Akumulator będzie powoli zyskiwał pełną pojemność a wraz z nią prąd będzie spadał a napięcie naturalnie rośnie. Koniec pracy normalnej kończy się z chwilą osiągnięcia warunków końcowych.

- koniec ładowania

Jeśli prąd ładowania będzie mniejszy od $I_{max}/10$ oraz napięcie końcowe będzie wynosić $V_{bat}>4.1V$ ładowarka zakończy ładowanie.

Prąd maksymalny ustawiany jest wartością rezystora pomiarowego oraz napięciem na pinie ADJ. W tym przypadku pin ten jest rozarty i wewnętrznie podciągnięty do napięcia 3V. Dla takiego napięcia na tym pinie prąd maksymalny dany jest wzorem $I_{max} = 150mV/R_{sns}$. W tej aplikacji rezystor $R_{sns} = 100m\Omega$ zatem prąd maksymalny wynosi 1,5A.

Ustawienie maksymalnego czasu ładowania jest częścią mechanizmu bezpieczeństwa aby nie ładować akumulatora w nieskończoność. Jeśli akumulator nie może się naładować jest możliwość że jego sprawność spadła na tyle że cała energia dostarczana do ogniwa jest zamieniana na ciepło. To powoduje zagrożenie eksplozją ogniwa jeśli nie ma ono zabezpieczenia termicznego. Ogólnie rzecz biorąc ustawienie czasu ładowania na 3h jest wystarczające. Ale najlepiej jeśli producent ogniwa poda takie informacje. Maksymalny czas ładowania jest ustawiany za pomocą kondensatora którego wartość wynosi $C_{timer} = (T_{CHG} * 10 - 6) / 1800$

gdzie:

- T_{CHG} maksymalny czas ładowania w minutach
- C_{timer} – pojemność w μF

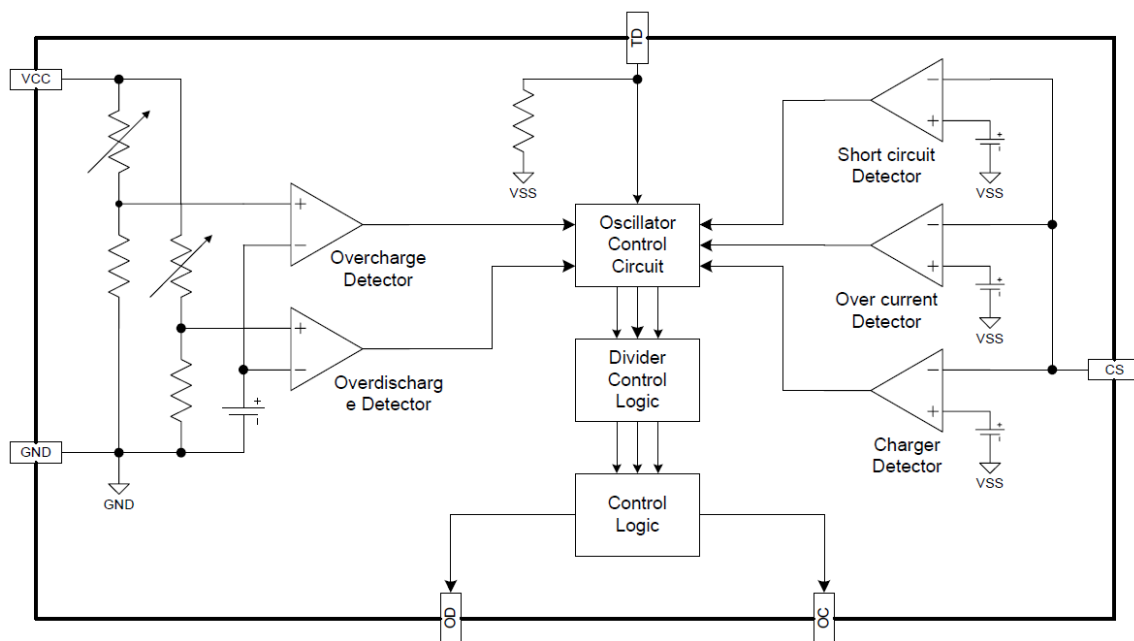
b) Układ nadzoru ogniwa DW01-P (PCM)

Układ DW01H jest zaprojektowany do zabezpieczenia ogniwa Li-Poly/Li-Ion przed zniszczeniem oraz zmniejszeniem jego żywotności poprzez pobieranie za dużego prądu czy nadmiernie naładowanie lub rozładowanie ogniwa. Układ dostępny jest w obudowie miniaturowej SOT-23-6, dzięki czemu znajduje swoje zastosowanie w aplikacjach gdzie jest ograniczona ilość wolnego miejsca. W tym przypadku układ PCM był dołączony do ogniwa przy jego zakupie.

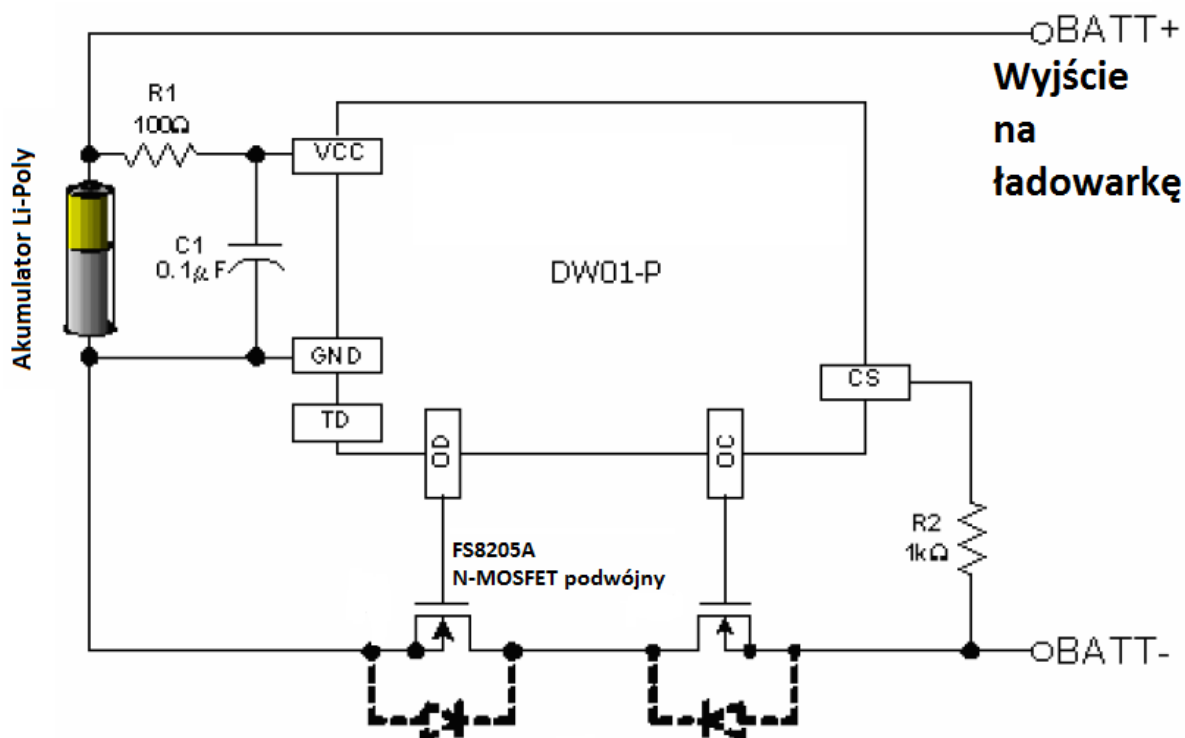
Dla czytelnego opisu, wartości zabezpieczeń zostały przedstawione w poniższej tabeli:

Zabezpieczenie przed przeładowaniem (nadnapięciowe)	Załączenie zabezpieczenia	4,28V
	Zwolnienie zabezpieczenia	4,08V
	Opóźnienie	200ms
Zabezpieczenie przed nadmiernym rozładowaniem (podnapięciowe)	Załączenie zabezpieczenia	2,4V
	Zwolnienie zabezpieczenia	2,5V
	Prąd spoczynkowy ($V_{bat} = 2V$)	1,8 μA
	Opóźnienie	100ms
Zabezpieczenie nadprądowe	Napięcie pomiarowe $VOIP = 150mV$ co w tej aplikacji i dobranym mosfecie wynosi 2,5A (dyskusja niżej)	
	Opóźnienie	20ms
Prąd spoczynkowy podczas normalnego działania ($V_{bat} = 3,9V$)	2,5 μA	
Zabezpieczenie zwarciovowe	Napięcie pomiarowe $VOIP = 700mV$ co w tej aplikacji i dobranym mosfecie wynosi 14A	
	Opóźnienie	1ms

Analizując schemat widać że układ ma w swojej strukturze wbudowane komparatory z pewną histerezą. Na jedno wejście podawane jest napięcie odniesienia które można znaleźć w tabeli (napięcia zabezpieczeń), natomiast na drugie napięcie do porównania. Po przekroczeniu napięcia odniesienia kontroler podaje odpowiedni stan na logikę sterującą bramkami tranzystorów które podpięte są bezpośrednio do wejść OC oraz OD.



Schemat wewnętrzny układu DW01



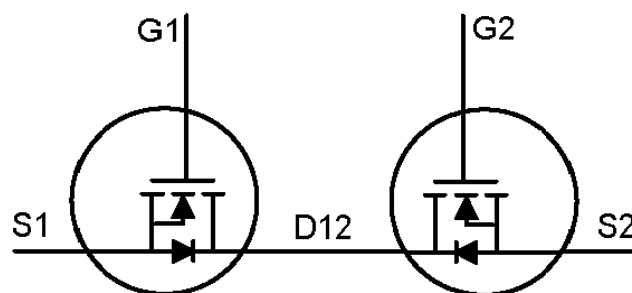
Schemat aplikacyjny układu DW01

- Zabezpieczenie nadprądowe

Podczas pracy normalnej układ ciągle sprawdza napięcie na pinie CS. Jeśli napięcie to przekroczy odpowiednie napięcie bezpieczeństwa (VOIP) w czasie TOI1 układ wyłączy tranzystory MOSFET. Powrót do pracy normalnej jest możliwy jeśli rezystancja na wyjściu układu jest większa od 500kΩ.

Maksymalna wartość zabezpieczenia prądowego zależy zatem od rezystancji $R_{DS(on)}$ tranzystora N-MOSFET. Należy zwrócić uwagę rezystancja tranzystora N- MOSFET zmienia się wraz z napięciem V_{gs} oraz temperaturą. Napięcie V_{gs} w tym przypadku będzie różne w zależności od napięcia akumulatora czyli od ok. 3V do 4.2V.

Zostały tutaj zastosowane tranzystory FS8205A firmy Fortune. Są to właściwie 2 tranzystory w jednej obudowie z połączonymi drenami (patrz rys. poniżej). Układ dostępny jest w obudowie TSSOP-8.



Wewnętrznie połączone tranzystory N-Mosfet w kostce FS8205A

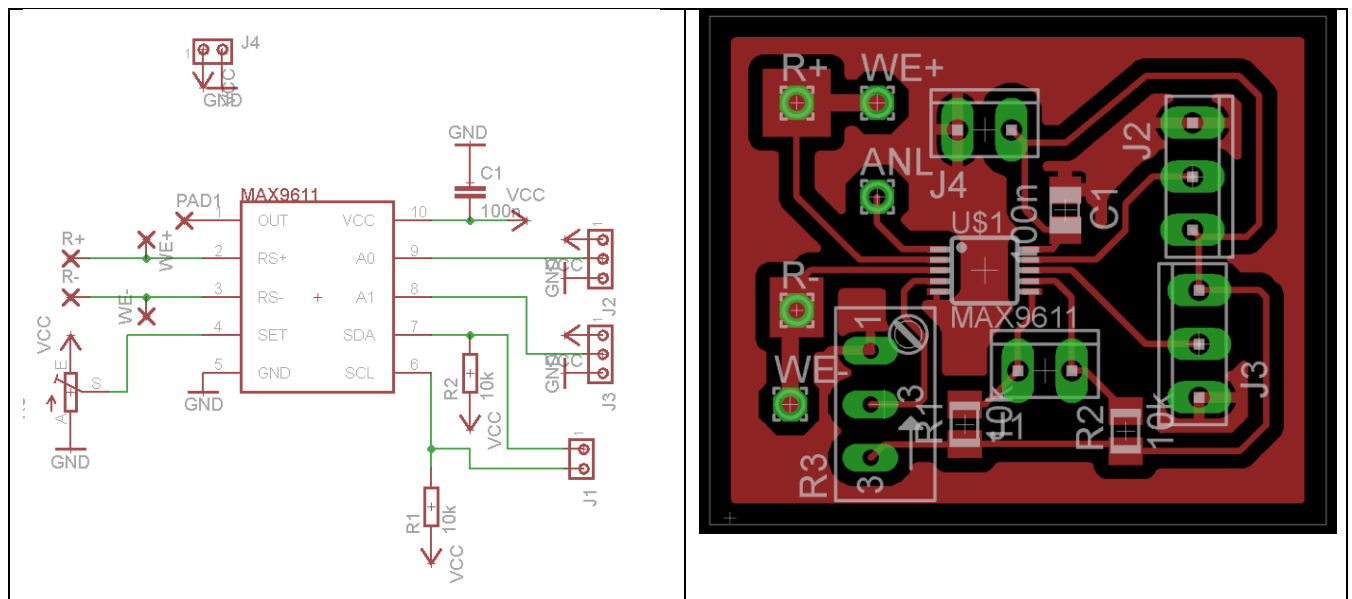
Przeznaczone są specjalnie do zastosowań niskonapięciowych. Dla $V_{GS}=2,5V$ $R_{DS(on)}=35m\Omega$, dla $V_{GS}=4,5V$ $R_{DS(on)}=25m\Omega$. Maksymalny prąd przewodzenia przy temperaturze 25°C wynosi 6A.

Znając już $R_{DS(on)}$ tranzystorów można obliczyć że maksymalny prąd zabezpieczenia będzie wynosić $I_{max}=VOIP/(2 \cdot R_{DS(on)})=0,15/(2 \cdot 30m)=2,5A$ dla $V_{bat} \approx 3,5V$

c) Pomiar prądu

Układ pomiaru prądu został oparty na kostce MAX4612 firmy Maxim Integrated. Jest to wzmacniacz pomiarowy typu high-side.

Przeciwnie niż we wzmacniaczu różnicowym, w którym wzmocnienie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego zależy od rezystorów zewnętrznych podłączonych do wejścia odwracającego i wyjścia, we wzmacniaczu pomiarowym stosuje się wewnętrzną sieć rezystorów sprzężenia zwrotnego. Sygnał wejściowy podłącza się do dwóch wejść różnicowych, a wzmocnienie jest ustalone na drodze cyfrowej.

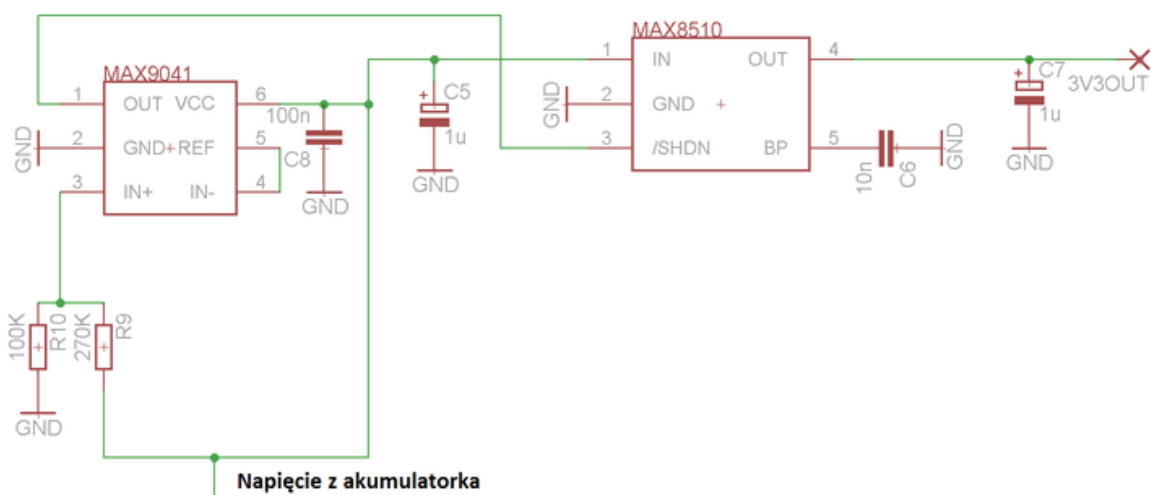


Schemat ideowy wzmacniacza pomiarowego oraz PCB

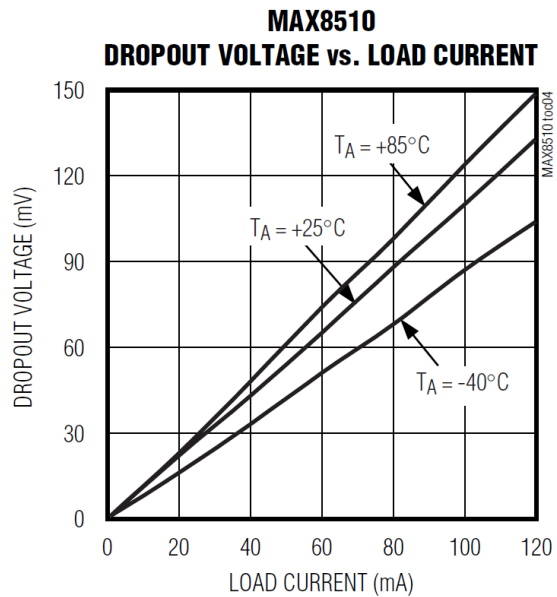
d) Stabilizator MAX8510 3,3V LDO z komparatorem podnapięciowym opartym na MAX9041

Stabilizator MAX8510 zasila wszystkie pozostałe układy znajdujące się zarówno w części analogowej jak i cyfrowej dlatego jest ważnym elementem konstrukcji. Seria stabilizatorów MAX851x jest to seria stabilizatorów LDO które znajdują zastosowanie w sprzęcie przenośnym zasilanym bateryjnie. Jest produkowany w małej obudowie(SC70-5) dzięki temu zajmuje mało miejsca na PCB.

Układ posiada niewielki prąd upływu (40uA) dzięki temu kwalifikuje się do aplikacji energooszczędnych.



Maksymalny prąd obciążenia to 120mA. Przy takim prądzie spadek napięcia na stabilizatorze wynosi tylko ok. 120mV (patrz wykres xxx). Jest to możliwe bo w strukturze wewnętrznej zastosowano P-MOSFET. Jego $R_{DS(on)}$ wynosi 1 Ω . To przynosi wiele zalet w porównaniu z standardowymi konstrukcjami stabilizatorów opartych na tranzystorze PNP. Oprócz mniejszego spadku napięcia, tranzystor MOSFET nie potrzebuje prądu bazy (jest sterowany napięciowo) dzięki czemu prąd spoczynkowy stabilizatora jest mniejszy co jest istotne w układach zasilanych baterijnie.



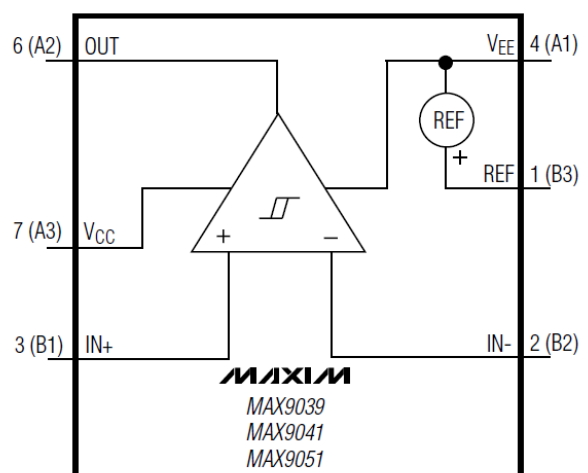
Zabezpieczenie nad prądowe i termiczne

Układ MAX8510 posiada zabezpieczenie nad prądowe które nie pozwala na przepływ prądu większego niż 200mA. Stabilizator posiada wbudowany pomiar temperatury złącza. Gdy przekroczy ono 160°C, układ pomiaru podaje sygnał logiczny do sterownika bramki mosfeta aby go wyłączyć. Jak temperatura MOSFETA zmniejszy się o 10°C układ wraca do normalnej pracy. Maksymalna dopuszczalna temperatura pracy stabilizatora to 150°C.

Producent zaleca na wyjście oraz wejście dać kondensatory ceramiczne min. 1uF dla zmniejszenia zakłóceń oraz lepszej odpowiedzi impulsowej układu. Dla kondensatorów elektrolitycznych wartość tą należy zwiększyć do min. 2.2uF.

Stabilizator posiada dodatkowy pin SHDN/ który po podaniu stanu niskiego (poniżej 0,4V) wyłączy regulator. Jest to przydatna funkcja w aplikacjach energooszczędnych gdyż pobierany prąd spoczynkowy w tym stanie wynosi ok. 9nA.

W tym urządzeniu pin SHDN będzie używany do wyłączania stabilizatora w przypadku gdy napięcie baterii będzie niższe od 3.4V. Stabilizator podpięty jest bezpośrednio do baterii dlatego zbytne obniżenie poniżej tego progu może spowodować że napięcie regulowane przez stabilizator zacznie się zmniejszać. Dzięki zastosowaniu stabilizatora z niskim spadkiem napięcia (LDO) i tak możemy zejść bardzo nisko.



Do wyłączenia stabilizatora zastosowany został układ MAX9041. Jest to komparator z wbudowanym wewnętrznym napięciem odniesienia o wartości 2.048V. Układ charakteryzuje się niskim poborem prądu (standardowo 47uA). Prąd polaryzujący wejścia jest na poziomie max 10nA dzięki czemu dzielniki mogą być dużej wartości rezystancji co obniża straty mocy odkładające się na rezystorach.

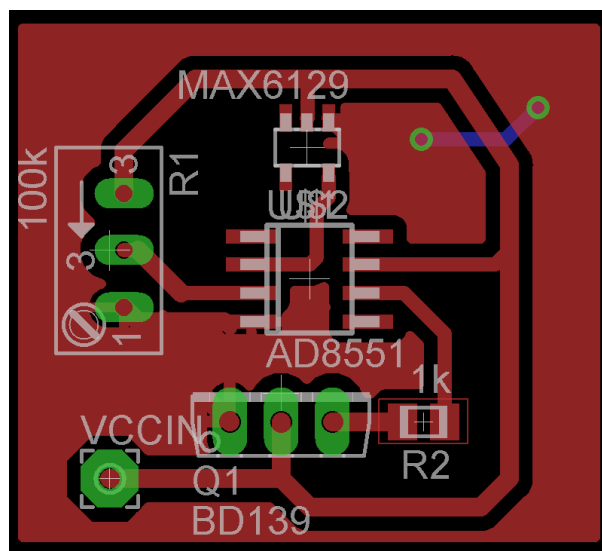
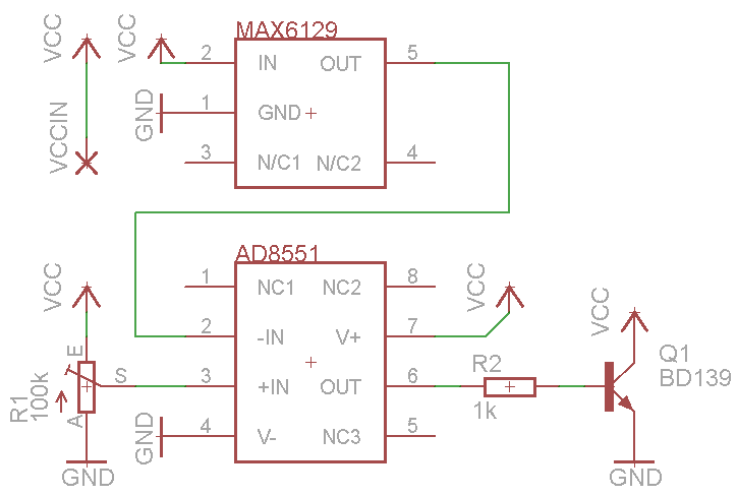
Na wejście odwracające komparatora podawane jest napięcie z dzielnika opartego na rezystorach R9 oraz R10. Przy napięciu 3.4V na baterii napięcie na dzielniku wynosi ok 2V. porównywane jest ono z napięciem odniesienia ok 2V (wejście nieodwracające połączone z wyjściem napięcia odniesienia). Jeśli napięcie na wejściu nieodwracającym będzie mniejsze od tego na odwracającym komparator zmieni stan na niski i wyłączy stabilizator.

Komparator może być zasilany napięciem pojedynczym ze względu na to że jest typu Rail-to-Rail. Dzięki temu napięcie w stanie niskim wynosi ok. 200mV co wystarczy do wyłączenia LDO ($V_{SHDN} < 0.4V$)

Układ taki powinien posiadać pewną histerezę aby zapobiec stanom przejściowym. Prościej mówiąc przy braku histerezy układ mógłby się cały czas włączać i wyłączać. Komparator posiada wewnętrzną histerezę o wartości $\pm 3mV$. Jest możliwość jej zwiększenia poprzez dwa zewnętrzne rezystory ale w tym przypadku jest ona wystarczająca.

Zabezpieczenie nadnapięciowe wejścia

Układ zasilany jest z w dwóch źródeł: panelu fotowoltaicznego oraz generatora. Maksymalne napięcie wejściowe zależy od układu ładowania ADP2291 i wynosi 12V. Panel fotowoltaiczny jest wpięty poprzez przetwornice DC która reguluje na swoim wyjściu odpowiednie napięcie - 4.4V. Natomiast generator wpinany jest bezpośrednio na wejście ładowarki. Pod obciążeniem napięcie samo ustala się na odpowiednim poziomie. Jeśli obciążenie spada napięcie wzrasta i na biegu jałowym może wynieść nawet **30V**. Stanie się tak gdy ogniwo będzie w pełni naładowane. Doprowadzi to do uszkodzenia układu ładującego a jeśli zewrze się on wewnętrznie może wyrządzić jeszcze większe szkody. Dlatego na wejściu został zastosowany układ zabezpieczenia przeciw wzrostowi napięcia ponad wartość niebezpieczną.



Schemat ogranicznika napięcia oraz PCB

Zasada działania jest dość prosta ale skuteczna. Zastosowany został tutaj wzmacniacz operacyjny AD8551. Jest to pojedynczy wzmacniacz z możliwością pracy w trybie zasilania pojedynczego. Ważne jest również że jest to wzmacniacz Rail-to-Rail czyli napięcia na wyjściu mogą być bliskie napięciom zasilania (dla tego wzmacniacza stan wysoki to 4,99V a niski 10mV), ponieważ nie mógłby poprawnieysterować tranzystora. Na wejście ujemne wzmacniacza podawane jest napięcie odniesienia o wartości 2,5V wytwarzane przez układ MAX6129. Potencjometr R1 służy do ustawienia progu zadziałania ograniczenia. W tym przypadku jest to napięcie 5V. Napięcie z potencjometru podawane jest na wejście dodatnie wzmacniacza. Jeśli będzie ono większe niż na wejściu ujemnym (czyli napięcie wejściowe przekroczy 5V), wzmacniacz zacznie otwierać tranzystor Q1 nie pozwalając na wzrost napięcia. Rezystor R2 ogranicza prąd bazy. Cała energia wydziela się na tranzystorze Q1. Zarówno układ MAX6129 jak i AD8551 są układami z niskim poborem prądu (układ razem pobiera nie cały 1mA) aby podczas pracy prawidłowej nie obciążać niepotrzebnie źródeł generacyjnych.

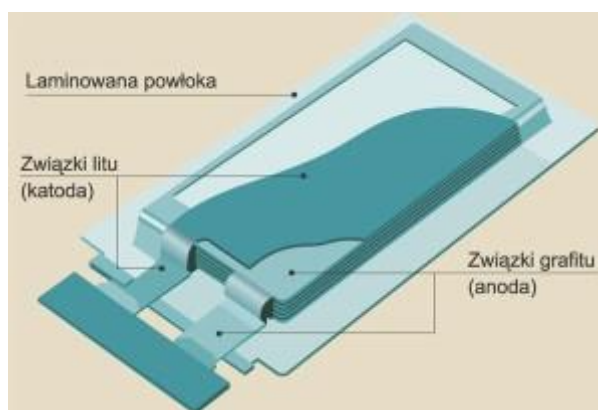
Ogniwo Li-Poly

Na rynku dostępne są akumulatory litowo-polimerowe, które czasami uznaje się jako lepsze od litowo-jonowych. W rzeczywistości różnica między nimi jest niewielka, gdyż ogniwa Li-Poly są w istocie ogniwami litowo-jonowymi, w których elektrolit to nie ciecz, a polimer. Dzięki temu takie ogniwa łatwiej jest dowolnie kształtować, a ponadto cechują się odrobinę większą gęstością mocy i zazwyczaj mają nieco wyższe napięcie znamionowe (3,7 V).

Ich zaletami jest to że bardzo wolno ulegają samo rozładowywaniu i są dosyć trwałe. Posiadają duże prądy rozładowania np. 45C, dzięki czemu aktualnie spotyka się je w samochodach czy autobusach silnikami elektrycznymi. Proces ładowania i związane z tym ograniczenia są praktycznie identyczne jak w przypadku ogniw Li-Ion.

Ich wadą jest fakt że ogniwa te są jednak nieodporne i łatwo je uszkodzić w wyniku niewielkiego nawet przeładowania. Przy przeładowaniu mogą ulec eksplozji, a palącą się baterie litowo-polimerową można ugasić gaśnicami do tego przeznaczonymi. Dlatego układy elektroniczne kontrolujące proces ładowania są bardzo złożone. [patrz układ PCM]

Akumulatory litowo-polimerowe, jak sama nazwa wskazuje, zbudowane są ze stopów litu oraz polimerów przewodzących. Poniższy obrazek przedstawia budowę pojedynczego ogniwa z wyprowadzoną: anodą (+) oraz katodą (-).



<http://forbot.pl/blog/akumulatory-litowo-polimerowe-li-po-kompedium-id291>

[26.10.2014]

Wydajność prądowa oznaczona jest literą C. Określa maksymalne natężenia prądu, który można pobierać z akumulatora. Nie jest podawana w amperach. Jest to mnożnik, który pozwala wyliczyć wydajność w amperach np. 5C. Spotyka się również oznaczenia typu 30-40C, gdzie 30C to typowa wydajność, a 40C to wydajność chwilowa. Oznacza to, że akumulator nie zostanie uszkodzony, jeśli prąd chwilowo podskoczy do przedziału 30-40C. Nadmierny prąd rozładowania może zaszkodzić głównie akumulatorom wykorzystywanym w aplikacjach pobierających duże prądy. Li-pole mają jednak duże wydajności prądowe i małe nadwyżki w konsumpcji energii nie doprowadzą do zapłonu. Na skutek nadmiernych prądów zdarza się często zjawisko puchnięcia akumulatora.

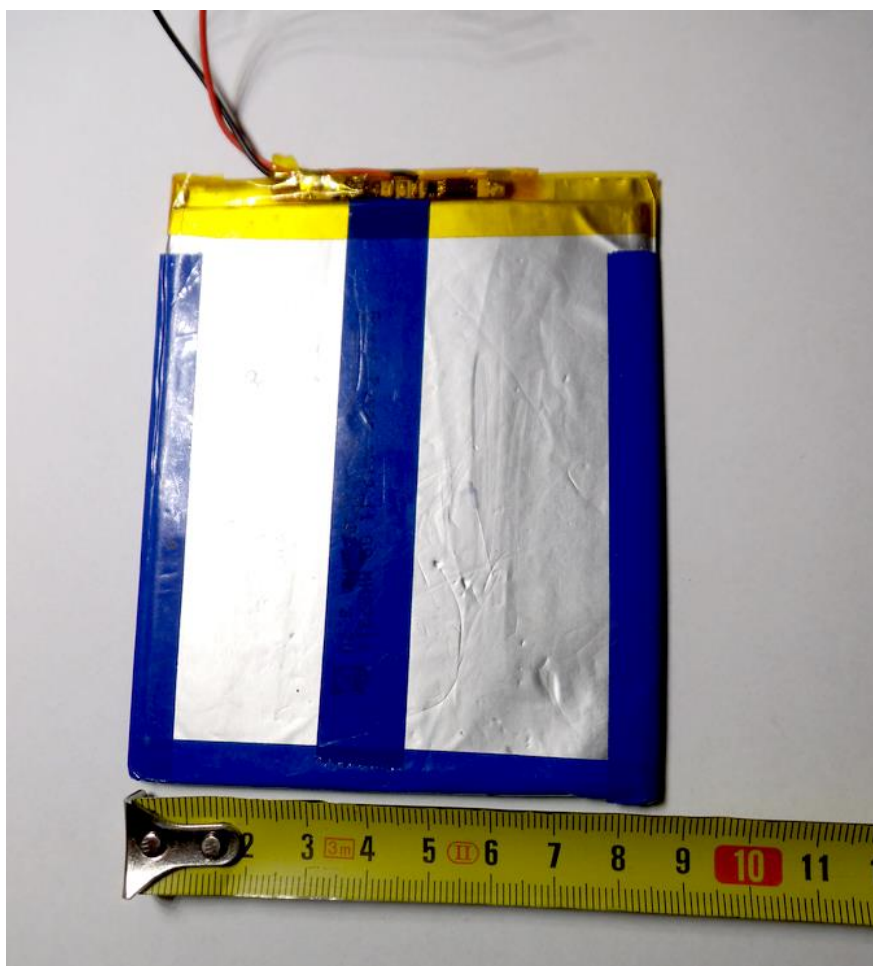
Ładowanie ogniw powinno być prowadzone zgodnie z notą aplikacyjną dostarczoną przez producenta. Powinien on określić maksymalny prąd ładowania i napięcie końcowe akumulatora. Jeżeli nie znaleźliśmy parametru w żadnym opisie, to dobrą praktyką jest przyjęcie parametru 1C. Należy pamiętać, że większy prąd ładowania skraca żywotność

akumulatora, dlatego w spokojnych warunkach warto ładować ogniwo prądem ok. 0.5C. Jeśli chodzi o napięcie to maksymalna jego wartość wynosi zazwyczaj 4.2V.

Ogniwa li-po nie rozładowują się liniowo. W okolicach napięcia znamionowego ogniwo “pracuje” najdłużej – po osiągnięciu 3,4V rozładowanie trwa bardzo szybko. Szybkość rozładowania jest zależna od pobieranego prądu – im jest większy, tym szybciej rozładowujemy akumulator.

Po pewnym czasie akumulator zaczyna tracić pojemność. Do pierwszych stu cykli ładowania pojemność jest równa 100-95% pojemności akumulatora. Po około 300 cyklach będzie wynosić już około 90%, a po następnych 200-300 cyklach spadnie do około 85%.

Great Power 3500mAh, 3,7V MH27311



Great Power 3500mAh, 3,7V MH27311

Przetwornica impulsowa LTC3114

Przetwornica LTC3114 jest synchroniczną przetwornicą buck-boost. W swojej strukturze posiada wewnętrzne tranzystory MOSFET. Napięcie wejściowe musi być w zakresie 2,2V – 40V, natomiast wyjściowe 2,7V-40V. Sprawność przetwornicy w zależności od warunków pracy może dość do 95%. Posiada tryb Burst Mode który jest użyteczny przy aplikacjach bateryjnych (przy niskich obciążeniach następuje zmniejszenie poboru prądu spoczynkowego do 30uA). Wewnętrzny oscylator ma częstotliwość 1,2MHz. Dzięki tak szybkiemu kluczowaniu, jest możliwość zastosowania dławika o niskiej indukcyjności a co za tym idzie rozmiarach.

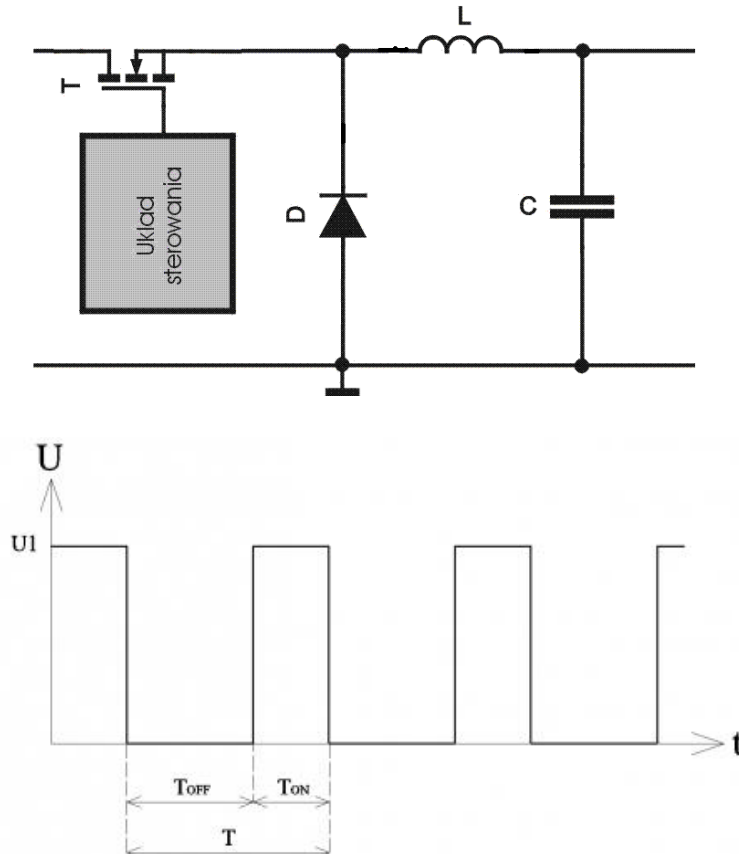
Topologia synchroniczna

Stosowanie klasycznego stabilizatora liniowego przynosi straty. Sprawność przetwarzania przy maksymalnej mocy dla naszego przypadku wyniosła by:

$$n = \frac{4,2 * 350m}{6,2 * 350m} * 100\% = 67\%$$

Zatem 33% energii tracone jest na ciepło.

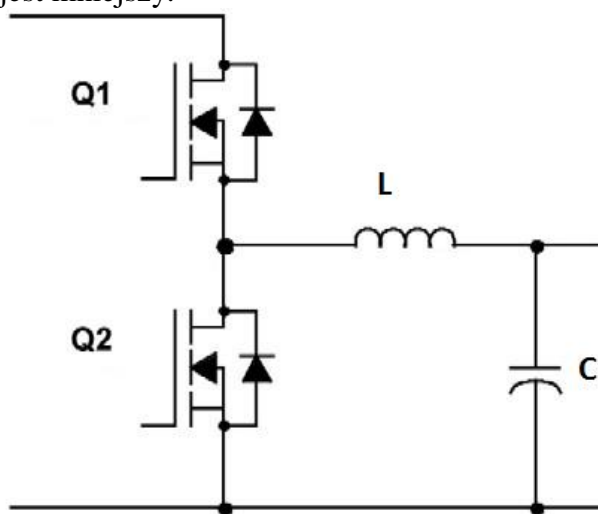
Zastosowanie zasilaczy impulsowych zdecydowanie polepsza sytuację. Przetwornice obniżające mają sprawność przekraczającą 90%. W klasycznej przetwornicy obniżającej najważniejszą rolę odgrywają dwa elementy przełączające: tranzystor i dioda. Aby zmniejszyć straty z reguły stosuje się tu tranzystor MOSFET (T) i diodę Schottky'ego(D)



Czas T podzielony jest na dwa takty, o długościach T_{on} i T_{off} (rys. 1.2). Pierwszy takt rozpoczyna się z chwilą podania na bramkę tranzystora Q napięcia o amplitudzie większej od napięcia progowego, w wyniku czego następuje załączenie tranzystora. Prąd płynie z wejścia przez dławik $L1$ do kondensatora $C1$ i obciążenia R_{obc} . Narazie dioda $D1$ jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i nie przewodzi prądu. Prąd dławika nie jest stały, narasta on zgodnie ze znanym wzorem $u=L \cdot di/dt$.

Z chwilą zdjęcia impulsu sterującego (T_{off}) z bramki tranzystora $T1$, rozpoczyna się drugi takt pracy układu. Wyłączenie tranzystora powoduje że w dławiku gwałtownie indukuje się coraz większe napięcie ujemne, aż do momentu, gdy przekroczy ono (co do modułu) wartość U_{wy} o napięcie progowe diody. Następuje wówczas spolaryzowanie diody $D1$ w kierunku przewodzenia i jej załączenie. W konsekwencji prąd dławika zamyka się przez diodę, a napięcie cewki utrzymuje się na stałym poziomie. Jak widać przepływ prądu w obwodzie musi być podtrzymany z powodu obecności dławika. Jest to ważne, gdyż świadczy o tym, że dławik pełni nie tylko rolę składnika filtra LC, ale również stanowi magazyn energii dla obwodu na czas braku ścieżki prądowej między wejściem a wyjściem.

Główną przyczyną strat jest tu spadek napięcia na tranzystorze i diodzie, podczas ich przewodzenia. Istotny wpływ ma również rezystancja cewki. Zastosowany tranzystor powinien mieć jak najmniejszą rezystancję w stanie otwarcia (R_{DSon}). Przy małych napięciach wyjściowych główną przyczyną strat okazuje się wtedy spadek napięcia na diodzie Schottky'ego. Teoretycznie powinien on wynosić $0,3 \dots 0,4V$, jednak w praktyce, przy dużych prądach może sięgać $0,6V$, czy nawet $0,7V$. Aby znacząco zredukować straty w tej diodzie, należy ją zastąpić tranzystorem MOSFET. Spadek napięcia na odpowiednio dobranym otwartym tranzystorze jest mniejszy.

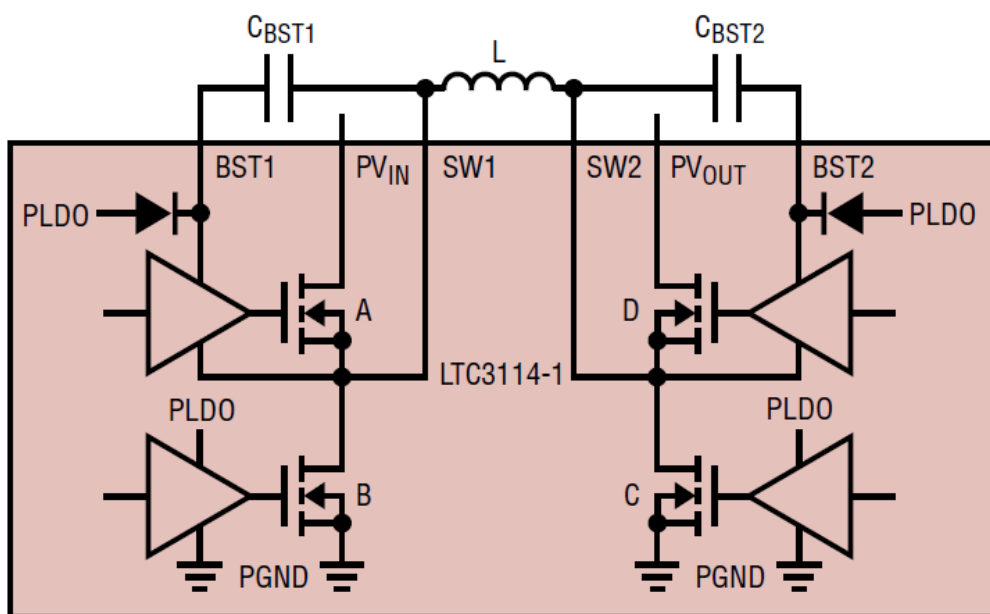


Idea modyfikacji pokazana jest na rysunku 5.

Uzyskuje się w ten sposób tak zwaną przetwornicę synchroniczną. Nietrudno zrozumieć zasadę pracy. Drugi tranzystor sterowany jest na przemian z pierwszym. Gdy przewodzi tranzystor $T2$, spadek napięcia na nim jest znacznie mniejszy, niż spadek napięcia na diodzie Schottky'ego. W rezultacie straty są znacznie mniejsze – sprawność przetwornicy znacząco rośnie.

W układzie z rysunków z rys. trzeba skutecznie wykluczyć możliwość jednoczesnego przewodzenia obu tranzystorów. Oznaczałoby to możliwość ich uszkodzenia lub duże straty energii. Aby wykluczyć możliwość przewodzenia obu tranzystorów nawet przez bardzo

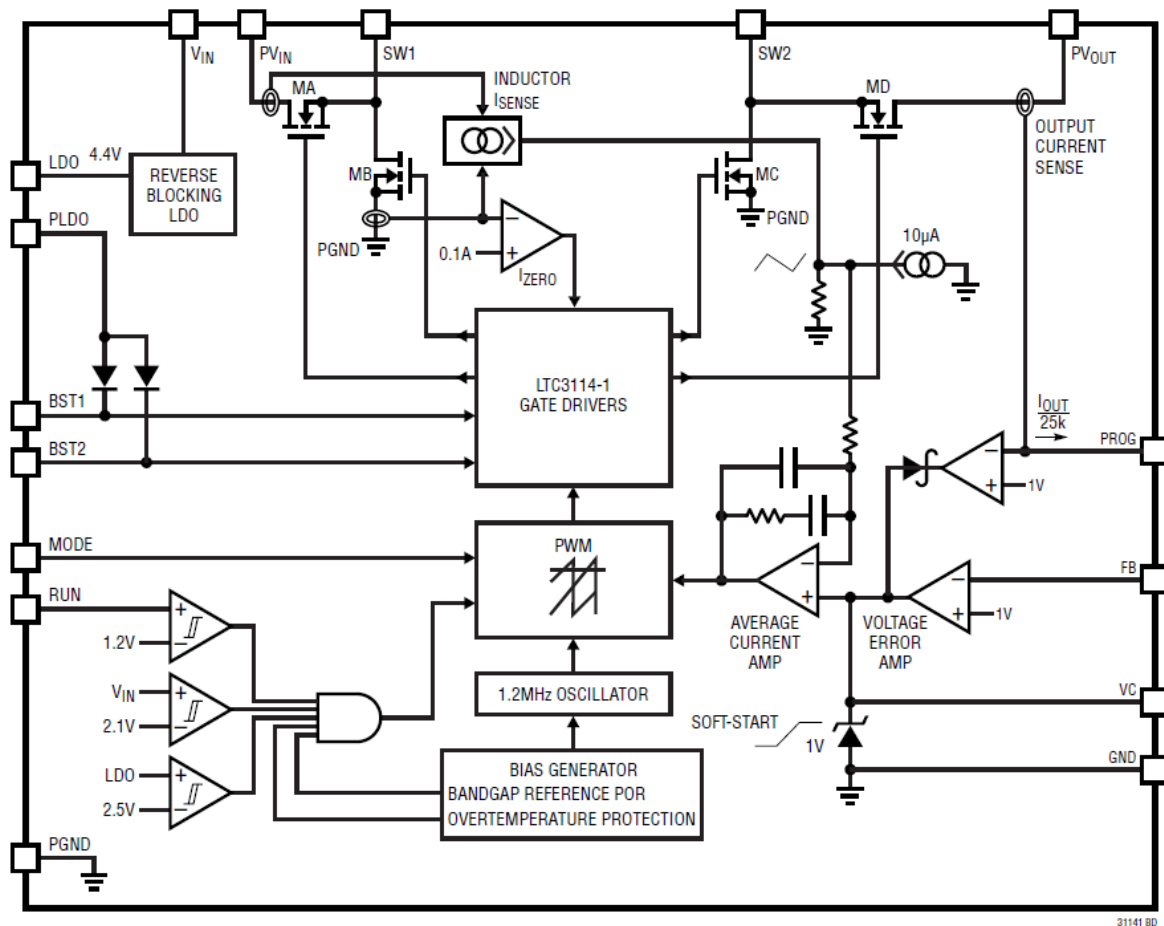
Przeanalizuje teraz schemat wewnętrzny obwodu mocy przetwornicy LT3114. Przy pracy w trybie obniżającym (buck) klucz D jest włączony przez cały czas kluczkowania z wyłączeniem czasu martwego który jest tu wymuszony (50ns) .Przez ten czas klucz C zostaje włączony i ściąga SW2 do masy naładowując kondensator bootstrapowy. CBST2. Dzięki temu zasilanie sterownika bramki klucza D jest utrzymane. Klucze A i B pracują naprzemiennie. Ich PWM zależy od wymaganego napięcia wejściowego.



Na schemacie wewnętrznym możemy rozróżnić kilka elementów. Widzimy omawiane wcześniej klucze MA, MB, MC, oraz MD. Ich bramki sterowane są przez sterownik (GATE DRIVER)

Wzmacniacz (VOLTAGE ERROR AMP) dokonuje pomiaru napięcia wyjściowego poprzez dzielnik napięcia podłączony do pinu FB. Aby zapewnić stabilność układu do wyjścia wzmacniacza (pin VC) należy podpiąć zewnętrzną sieć kompensacyjną złożoną ze elementów CP1, CP2 i RZ. Wyjście wzmacniacza podłączone jest z wejściem nieodwracającym wzmacniacza (AVERAGE CURRENT AMP). Wejście odwracające wzmacniacza jest połączone poprzez rezystory ustawiające wzmocnienie czujnika pomiaru prądu dławika (pomiar prądu działa jak przekładnik prądowy, wymusza prąd przez rezystor

Rs na którym odkłada się napięcie mierzone przez wzmacniacz). Między wejście a wyjście odwracające tego wzmacniacza dołączony jest filtr który odpowiada za kompensację częstotliwościową. Wyjście wzmacniacza steruje wypełnieniem PWM przetwornicy.

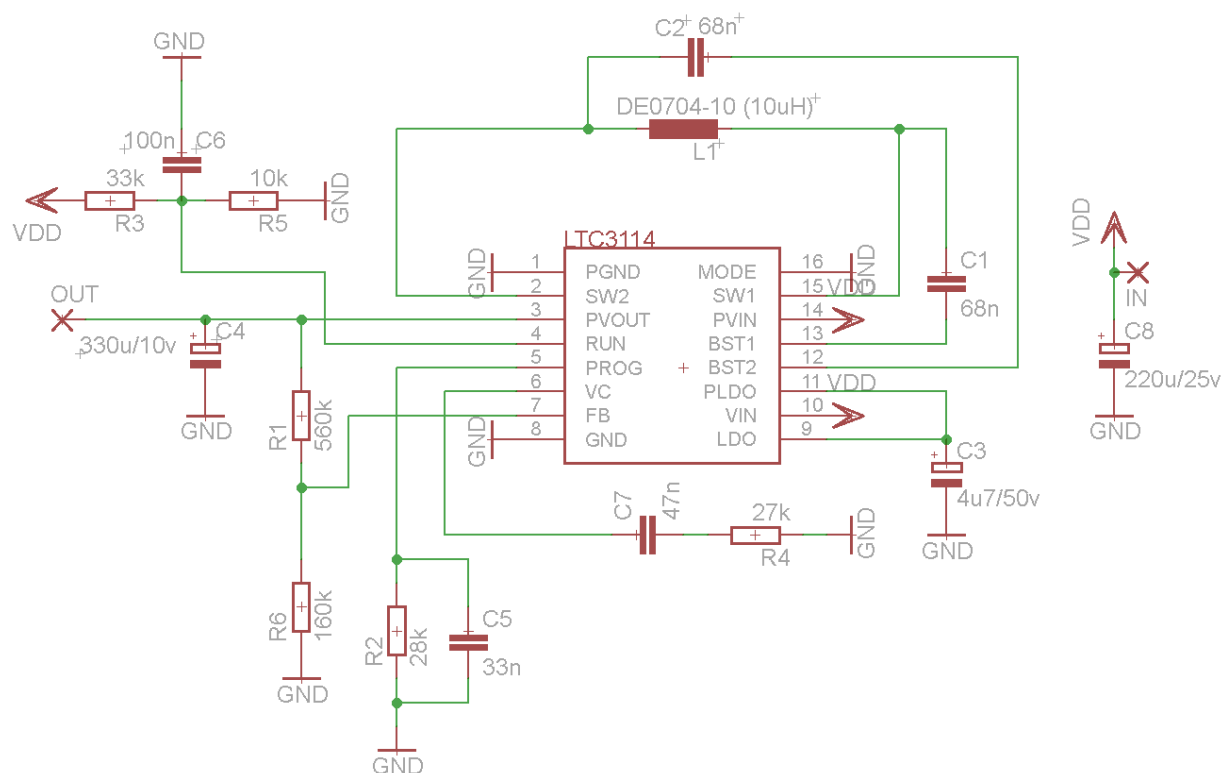


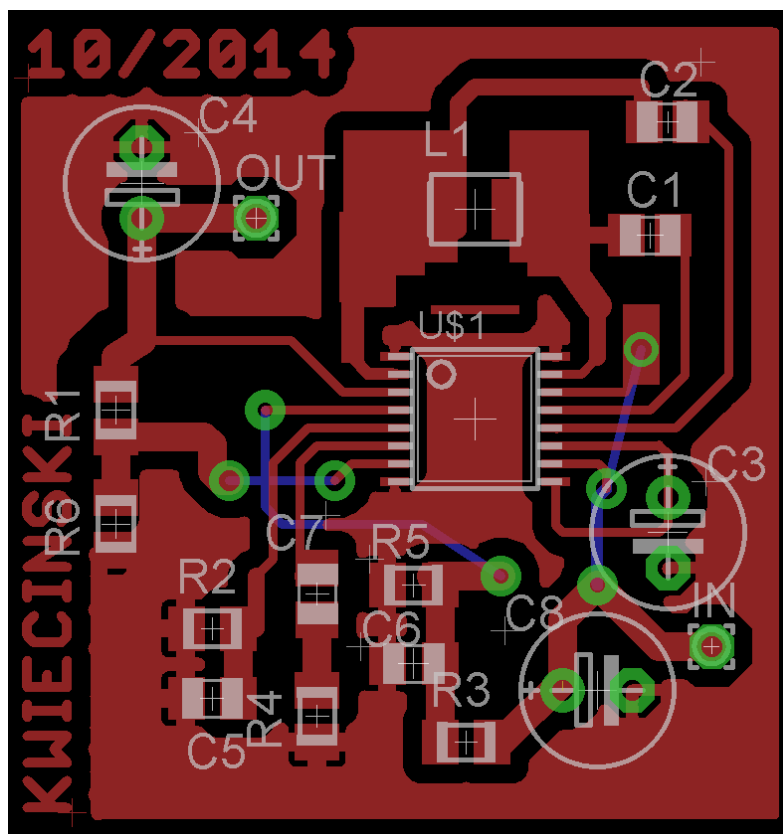
Rys. Schemat wewnętrzny LTC3114

W lewym dolnym rogu schematu możemy zobaczyć 3 komparatory. Są one związane z zabezpieczeniami podnapięciowymi. Pierwszy komparator na wejście (+) podłączony jest pin run. Na wejście (-) podłączone jest wewnętrzne napięcie odniesienia 1.2V. Pin ten służy do uruchamiania całej przetwornicy. Jeśli napięcie na nim przekroczy napięcie odniesienia 1.2V (napięcie to może być w granicach 1.185 do 1.29) jeden z 3 warunków uruchomienia przetwornicy zostanie spełniony. Histereza komparatora wynosi 140mV. W moim zastosowaniu pin ten jest używany gdyby napięcie na ogniwie spadło poniżej 5.2V, przetwornica nie pracuje. Napięcie to wyznacza dzielnik rezystorowy złożony z rezystancji R3 oraz R5.

Kolejny komparator do wejścia (+) doprowadzone ma napięcie zasilania a do wejścia (-) napięcie 2,1V. Jeśli napięcie zasilania nie jest powyżej tej wartości przetwornica nie ruszy.

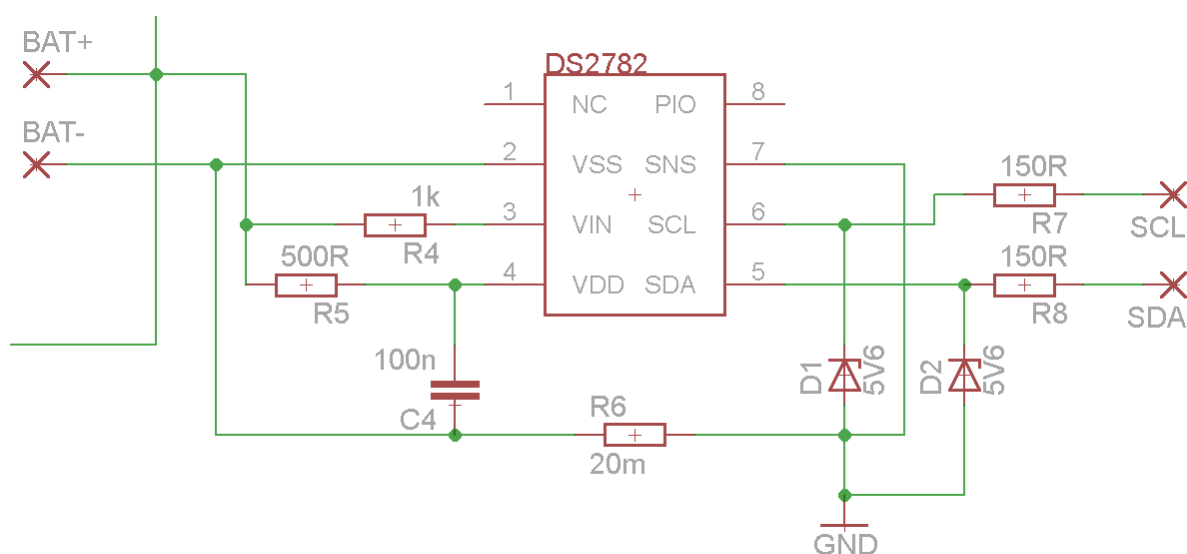
Ostani komparator do wejścia (+) ma doprowadzone napięcie wewnętrznego stabilizatora LDO. Jest on niezbędny do pracy sterowników bramkowych co opisywałem przy omawianiu obwodu mocy. Napięcie LDO musi wynieść minimum 2,5V.





Układ pomiaru parametrów bateri DS2782 (ang. fuel gauge)

W urządzeniu został zastosowany układ DS2782. Monitoruje on parametry ogniwa takie jak napięcie, prąd oraz estymuje pojemność ogniwa. Szczegółową charakterystykę ogniwa (która jest otrzymywana w procesie uczenia) oraz jego parametry (wprowadzane ręcznie) zapisywane są w pamięci nieulotnej EEPROM.



Rysxxx: Aplikacja układu DS2782 w urządzeniu

Układ komunikuje się z procesorem za pomocą interfejsu I2C. Działa on w zakresie napięć od 2.5V do 4.5V ze względu na to że jest zasilany bezpośrednio z ogniwa. Prąd podczas pracy to ok. 65uA a w trakcie uśpienia wynosi maksymalnie 3uA.

Układ określa ile zostało energii za pomocą pomiarów następujących wartości:

- Pomiar napięcia baterii

Układ posiada wewnątrz przetwornik A/C/ Napięcie baterii mierzone jest na nóżce 3 (VIN) w odniesieniu do VSS z rozdzielczością 4.88mV. Rejestr z wynikiem aktualizowany jest co 440ms.

- Pomiar temperatury

DS2782 posiada zintegrowany pomiar temperatury z rozdzielczością 0.125oC. Jest on niezbędny gdyż pojemność ogniwa zależy od temperatury w jakiej się znajduje i na jej podstawie kostka wylicza pojemność ogniwa.

- Pomiar prądu

Prąd mierzony na podstawie napięcie które odkłada się na rezystorze pomiarowym R6 (20mR). Jest to rezystor 1% o niskim współczynniku temperaturowym. Układ umożliwia kompensację ewentualnych niedokładności rezystora za pomocą rejestrów RSGAIN oraz RSTC. Pomiar napięcia na rezystorze jest na nóżce 7 (SNS). Rozdzielczość wynosi 78,13uA.

Konfiguracja układu

Aby układ poprawnie obliczał ile energii zostało w ogniwie wprowadzony musi zostać szereg parametrów:

Full 40	Pojemność ogniwa dla temperatury 40oC	4000mAh
Active Empty 40	Pojemność przy której urządzenie całkowicie się wyłącza	100mAh
Active Empty Current (AEC)	Prąd rozładowana przy stanie Active Empty.	10mA
Active Empty Voltage (AEV)	Napięcie przy stanie Active Empty.	
Minimum Charge Current (MCC)	Minimalny prąd ładowania	
Charge Voltage (CV)	Napięcie naładowania	
Sense Resistor Prime	Wartość rezystora pomiarowego	20mR

--	--	--

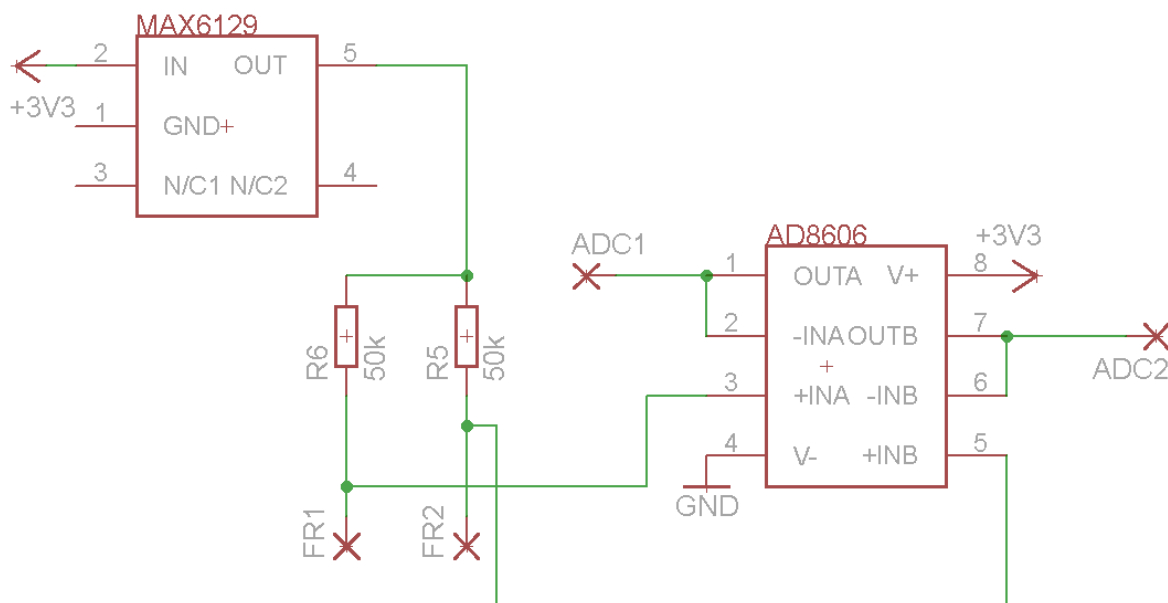
Należy starannie dobrać parametry które zostaną wprowadzone do pamięci EEPROM gdyż od ich wartości zależy prawidłowość określenia ile energii zostało w ogniwie.

Następnym krokiem jest wykonanie procesu uczenia kostki. Należy rozładować ogniwo do zadanego wcześniej progu. Gdy zostaną osiągnięte odpowiednie warunki ($V_{BAT} < AEC$ oraz $IBAT > IAE$) flaga LEARNF zostanie ustawiona na 1. Należy wtedy zacząć ładować ogniwo. Po osiągnięciu warunków naładowania ($V_{BAT} > MCC$, $IBAT < MCC$) flaga zostanie ustawiona na 0 z czym zakończ się proces uczenia.

Pojemność ogniwa w procentach można odczytać z rejestru RARC (jest to pojemność która została uwzględniając stan Active Empty).

Nadążność panelu

Układ fotorezystorów



Rys 12. Układ przetwarzający napięcie z fotorezystorów

Jako czujniki światła zostały zastosowane dwa fotorezystory o rezystancji $50k\Omega$ dla natężenia światła 10lx. Elementy te podpinane są pod pady FR1 oraz FR2. Tworzą one

dzielnik rezystancyjny złożony z dwóch rezystorów $50k\Omega$: R6 oraz R5. Dzielnik zasilany jest z napięcia odniesienia 2.5V które wytwarza układ MAX6129 (układ ten dokładniej został opisany w sekcji Zabezpieczenie nadnapięciowe wejścia). Wydajność takiego dzielnika jest bardzo niewielka i bezpośrednie podłączenie przetwornika A/C pod taki dzielnik mogło by spowodować niepoprawny pomiar. Dlatego został użyty układ AD8606. Jest to wzmacniacz operacyjny podwójny typu Rail to Rail. Może być zasilany pojedynczym napięciem od 2.7V do 5.5V co jest idealne do tej aplikacji (zasilanie od 3.4V do 4.2V). Posiada znikomy prąd polaryzujący (w pełnym zakresie temperaturowym maksymalnie 50pA) dzięki czemu nie obciąża dzielnika oraz niewielki offset napięciowy (maksymalnie 75uV). Pobiera ok. 1mA prądu zasilającego. W tej aplikacji użyty jest jako wtórnik napięciowy. Wyjścia podłączone są bezpośrednio do przetwornika A/C.

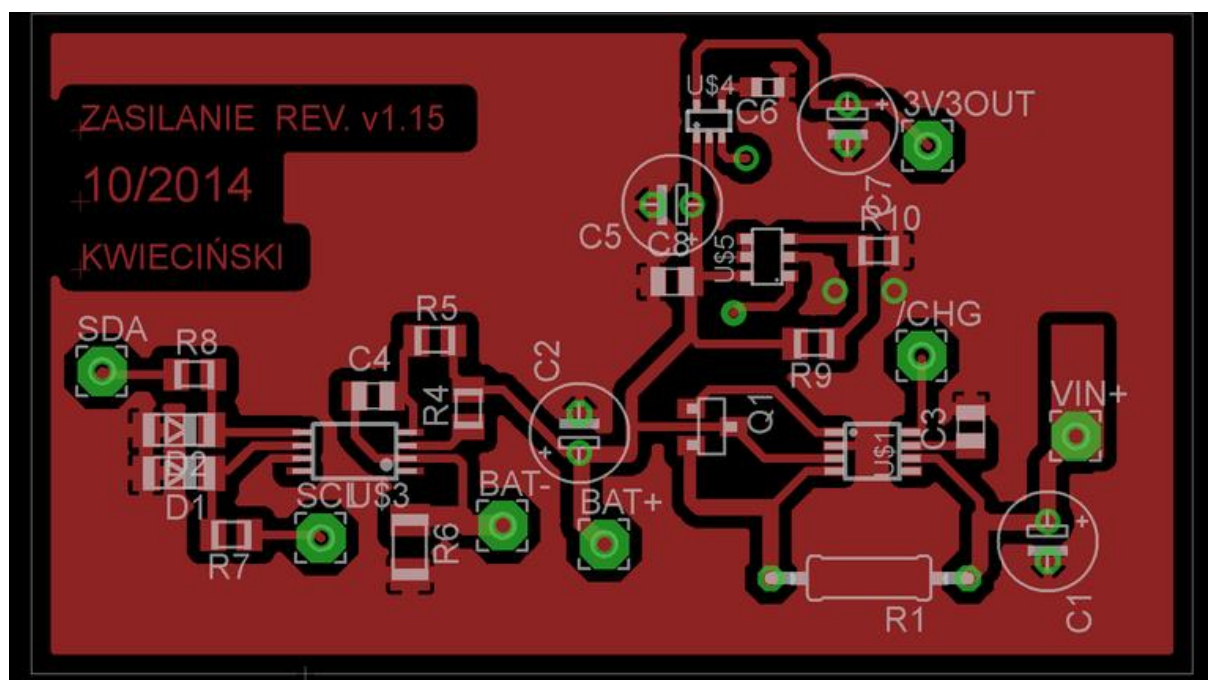
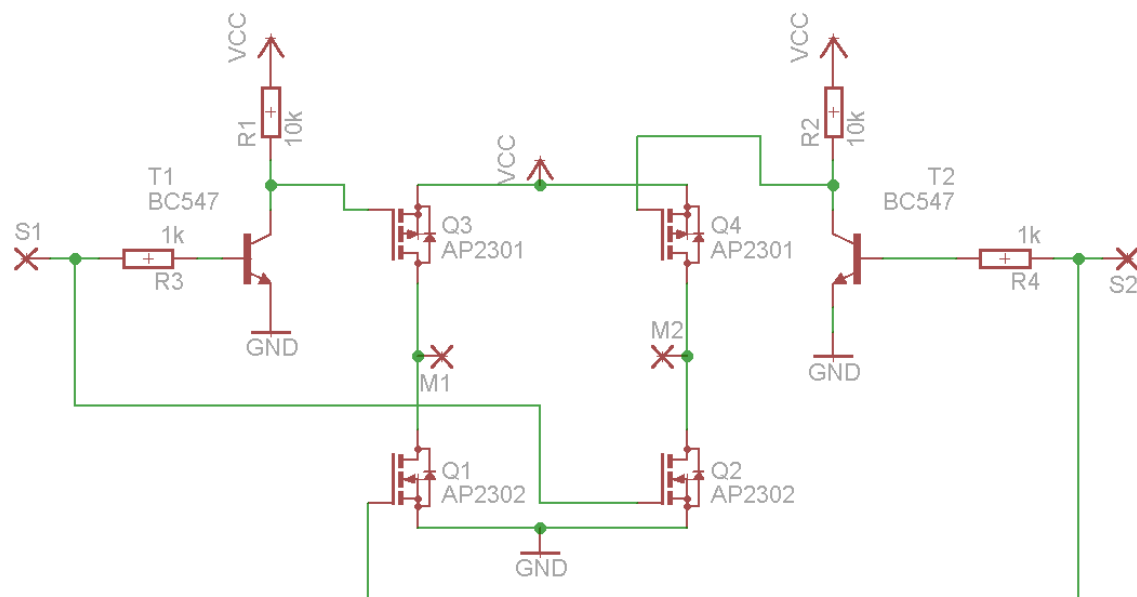
Mostek H

Mostek H jest układem elektrycznym umożliwiającym sterowanie kierunkiem działania silników prądu stałego. Jest często używany w robotyce. Można je zrobić z oddzielnych części (elementów dyskretnych) lub zastosować gotowe układy scalone.

Pojęcie "mostek H" wywodzi się z graficznego odwzorowania układu. Mostek ten jest zbudowany z 4 styków (elementy półprzewodnikowe bądź mechaniczne). Do padów M1 oraz M2 podłączone jest uzwojenie twornika. Kiedy tranzystory Q3 i Q2 są zamknięte, a Q4 i Q1 otwarte, do silnika będzie doprowadzone napięcie i zacznie się on kręcić. Poprzez otwarcie styków Q3 i Q2 oraz zamknięcie Q4 i Q1 zmieniamy kierunek przepływu prądu, tym samym zmieniając kierunek obrotu wirnika. ([źródło wikipedia](#))

Układ AP2301 to tranzystor P-MOSFET natomiast AP2302 to tranzystor N-MOSFET, wyprodukowane przez firmę Advanced Power Electronics. Tranzystor AP2302 ma $R_{DS(ON)}$ na poziomie 42mR. Tranzystor osiąga taką rezystancję już przy $V_{GS}=2,3V$ Maksymalny prąd ciągły wynosi 4,6A.

Należy zauważyć że w przypadku zamknięcia tranzystora Q3 i Q1 lub Q2 i Q4 nastąpi zwarcie nieskończone. Tranzystory jednak nie zostaną uszkodzone. Układ PCM baterii jeśli wykryje zwarcie odłączy ją, natomiast maksymalny prąd ciągły jaki można pobrać z baterii to 2,5A. Mosfety wytrzymują 3.3A (P-MOSFET) prądu ciągłego i 4,6A (N-MOSFET). Oczywiście nie wytrzymały by takiego zwarcia mocowo, ale na zasilaniu mostka jest bezpiecznik o wartości 0.5A i charakterystyce szybkiej który przepali się podczas zwarcia. Dodatkowo układ posiada zabezpieczenia softwarowe.



1. http://pl.wikipedia.org/wiki/Szczotka_%28elektrotechnika%29' 26.10.2014
2. http://pl.wikipedia.org/wiki/Pier%C5%9Bcie%C5%84_%C5%9Blizgowy 26.10.2014
3. http://www.gakra.pl/materialy/malowanie_aerozolami.pdf