

# Moduł zasilający

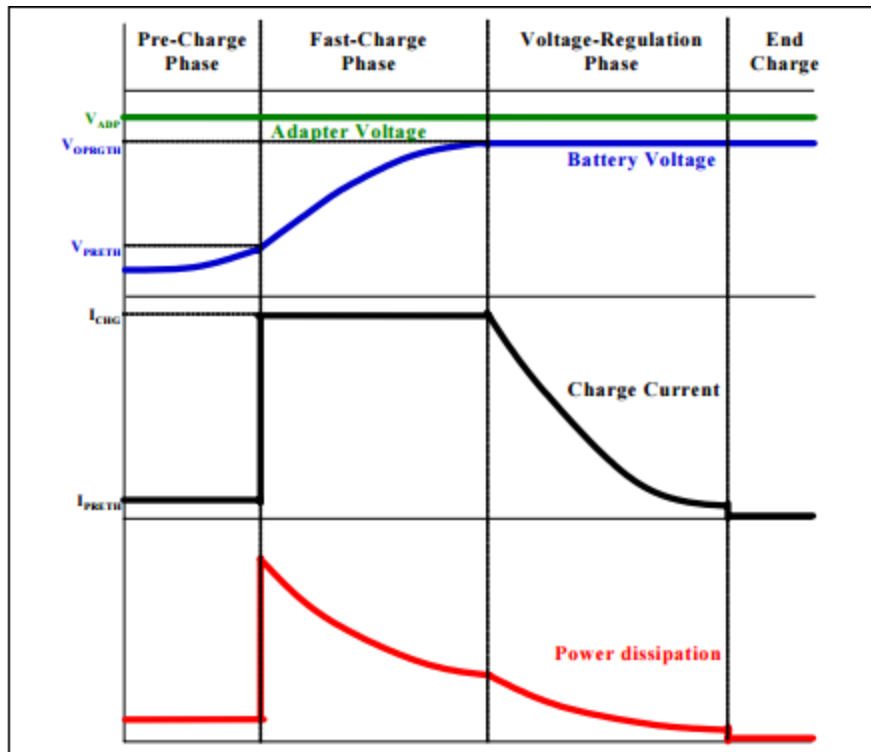
Do zasilania elementów systemu wykorzystano dedykowany moduł, którego zadaniem będzie nadzorowanie procesu ładowania akumulatora litowo-polimerowego jak i konwersja napięcia wyjściowego ognia na 3,3 V, które to jest wykorzystywane do zasilania pozostałych urządzeń. Stan baterii, to jest napięcie wyjściowe oraz dostępna pojemność, jest mierzony poprzez układ tzw. *Fuel Gauge*, którego zadaniem jest pomiar prądu i napięcia ogniwa i na jego podstawie wyznacza on zgromadzony ładunek elektryczny. Mikrokontroler nadzoruje ładowanie i stan baterii. Akumulator litowo-polimerowy dostarcza napięcie w zakresie 4,3-3,0 V, które jest przekonwertowane na 3,3 V przy pomocy przetwornicy Buck-Boost.

[---graph---]

## Bateria

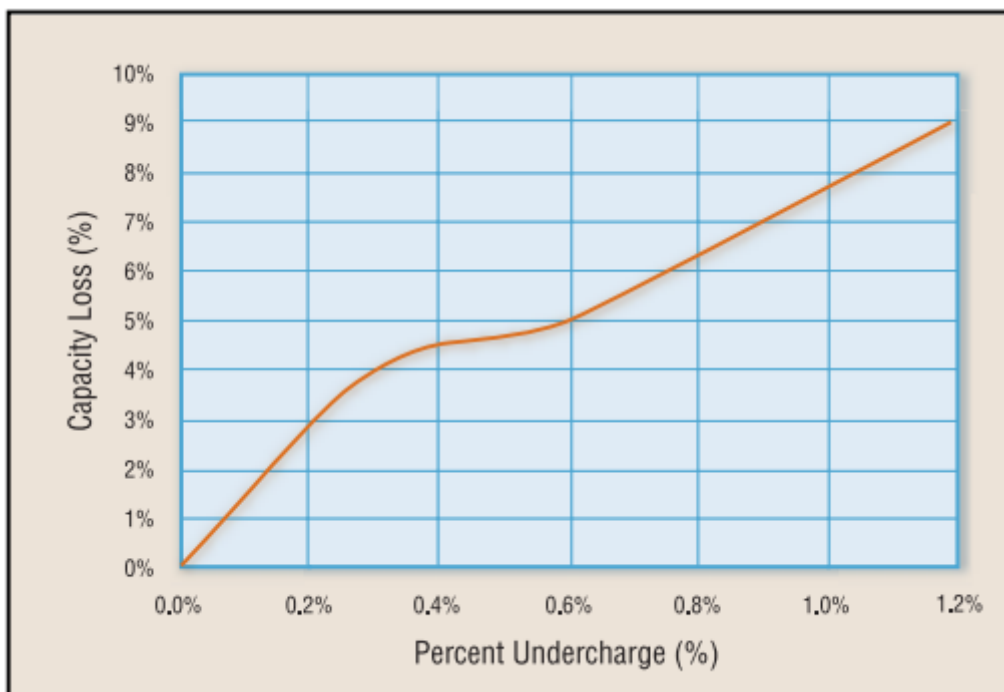
Z aktualnie dostępnych na rynku akumulatorów dobrym współczynnikiem objętości ogniwa do zgromadzonej pojemności cechują się akumulatory litowo-polimerowe. Pojemność zastosowanego w tym projekcie ogniwa to 180 mAh, a wymiary to 32 mm długości, 12 mm szerokości oraz 4 mm grubości.

Ogniwa litowo-polimerowe wymagają odpowiedniej procedury ładowania, tzn. początkowo akumulator zasilany jest z źródła prądowego aż do osiągnięcia napięcia w granicach ok 3,8 V kiedy to należy zmienić tryb zasilania na napięciowe o wartości 4,2 V. Dodatkowo w przypadku znacznie rozładowanego ogniwa stosuje się tzw. tryb *pre-charge* w którym ogniwo ładowane jest niewielkim prądem rzędu kilkudziesięciu mA, pozwala to odzyskać znaczną część pojemności ogniwa, lecz znaczne rozładowanie zwykle powoduje nieodwracalną stratę pojemności. Wykres ładowania przedstawiono na rysunku [--]



Rys [--] Przykładowe wykresy ładowania ogniwa litowo-polimerowego

Niedokładność napięcia ładowania w trybie *constant voltage* wpływa na pojemność baterii zgodnie z wykresem z rysunku [--TODO--].



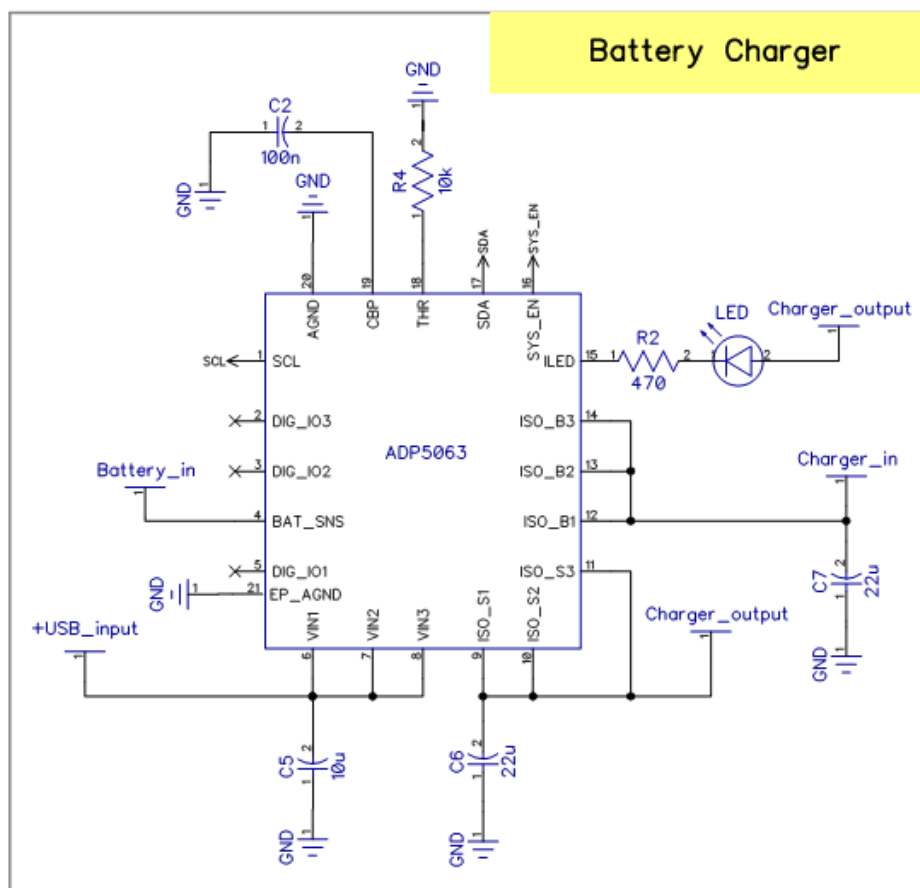
Rys [--TODO--] Wpływ błędu napięcia końcowego procesu ładowania na pojemność ogniwa

[źródło: <http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/mag/504PET23.pdf> --TODO--]

## Układ ładujący

Układ ADP5063 wykorzystano do ładowania ogniwa ze względu na zintegrowane wewnętrznie elementy sterujące procesem takie jak tranzystory kontrolujące przepływ prądu, czujnik prądu ładowania oraz zabezpieczenia chroniące przed zwarceniem lub brakiem akumulatora.

Układ kontrolujący ładowanie jest przystosowany do współpracy z ogniwami o różnych parametrach ładowania takimi jak standardowe ogniwa litowo-polimerowe, czy litowo-żelazowo-fosforanowych. Napięcie ładowania oraz prąd są ustawiane przez mikrokontroler komunikujący się z sterownikiem poprzez interfejs I2C. Układ ten pobiera 5  $\mu\text{A}$  w trybie Standby, dzięki czemu nie obciąża baterii gdy nie jest wykorzystywany. Schemat połączeń układu ADP5063 zaprezentowano na rysunku 1. [TODO change numeration]



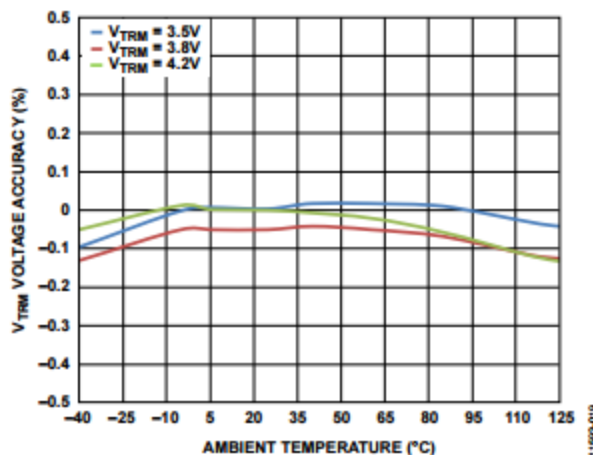
Rys [--TODO--] Schemat podłączenia układu ADP5063

Po podłączeniu zewnętrznego źródła zasilania do gniazda USB ADP5063 informuje mikrokontroler, który następnie inicjuje sekwencję ładowania danymi charakterystycznymi dla dołączonego ogniwa. Dodatkowo napięcie zasilające moduł jest pobierane z portu USB poprzez liniowy regulator 4,3 V wbudowany w układ kontrolera. Parametry ładowania są przekazywane do mikrokontrolera, dzięki czemu użytkownik ma wgląd na przebieg proces. Użytkownik ma możliwość ustawienia parametrów takich jak:

1. Prąd i napięcie ładowania w trybie *pre-charge*. Dla ogniwa wykorzystanego w tym projekcie wartości te zostały ustawione na 5 mA - minimalna wartość tego parametru oraz 2,5 V.
2. Prąd ładowania w trybie *constant current*. Dla ogniwa o pojemności 180 mAh wartość ta jest ustawiona na 50mA.
3. Wartość graniczna przejścia *constant current* na tryb *constant voltage*. Domyślnie 3,8 V.
4. Prąd i maksymalny czas pracy kontrolera w trybie *Fast charge*. Tryb ten znacznie wpływa na żywotność ogniwa dlatego nie jest wykorzystywany w tym projekcie.
5. Warunek zakończenia cyklu ładowania. Bateria jest uznana za w pełni naładowaną gdy prąd spadnie poniżej wartości 12,5 mA.
6. Napięcie histerezy dla ponownego cyklu ładowania. Kontroler przełącza zasilanie na zewnętrzne gdy jest ono dostępne dlatego ogniwo nie jest obciążone w tym przypadku, nowy cykl ładowania rozpocznie się gdy napięcie spadnie o 80 mV.

Układ ADP5063 charakteryzuje się niewielkim błędem napięcia końcowego ładowania.

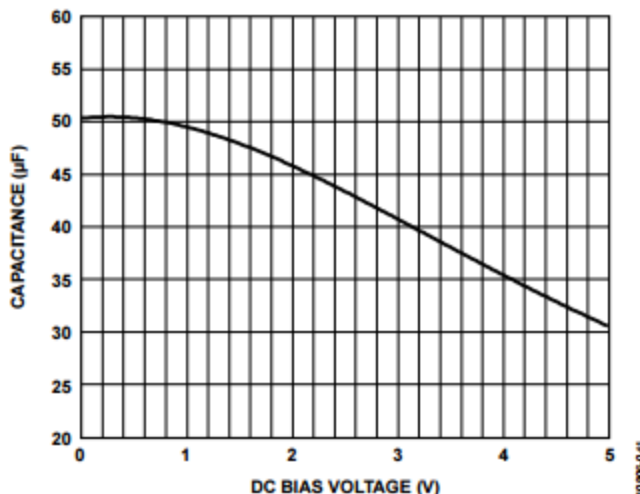
Rysunek [--TODO--] przedstawia wykres tego parametru w stosunku do temperatury otoczenia. Producent wskazuje maksymalny błąd rzędu 0,5% co przekłada się na utratę ok. 5% pojemności ogniwa.



Rys [--TODO--] Napięcie końcowe ładowania w zależności od temperatury otoczenia  
[źródło <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP5063.pdf>  
--TODO--]

Producent zaleca minimalną wartość pojemności na wyjściu kontrolera na 10  $\mu$ F, lecz przy doborze tego elementu należy uwzględnić spadek pojemności na skutek temperatury czy

napięcia. Zależność pojemności od napięcia dla przykładowego kondensatora jest przedstawiona na rysunku [---], z tego wykresu wynika iż spadek rzędu 50-60% występuje dla niewielkich napięci dlatego należy go uwzględnić przy doborze pojemności wyjściowe. Jako kondensator wyjściowy dla ADP5063 zastosowano produkt 22  $\mu\text{F}$ .



Rys [---] Wpływ napięcia kondensatora na jego pojemność

## Układ estymacji pojemności baterii

Charakterystyczny kształt krzywej napięcia ogniwa litowo-polimerowego pozwala określić dostępną pojemność w sposób przybliżony ponieważ pobierany prąd na duży wpływ na wykres, przez co dobrą estymację na podstawie napięcia można uzyskać tylko dla zerowego prądu wyjściowego.

Do wyznaczania aktualnej pojemności baterii wykorzystano układ LTC2942, który to mierzy przepływający ładunek elektryczny od i do akumulatora, pozwala to określić stopień rozładowania ogniwa. Pomiar pozostałego ładunku zgromadzonego w źródle litowo-polimerowym wymaga pomiaru prądu przez cały cykl rozładowywania. Układ LTC2942 mierzy pojemność poprzez sumowanie wykorzystanego ładunku przez obciążenie, aby móc określić procentową wartość tego parametru należy określić pojemność całkowitą ogniwa poprzez jeden cykl pełnego rozładowania i ładowania.

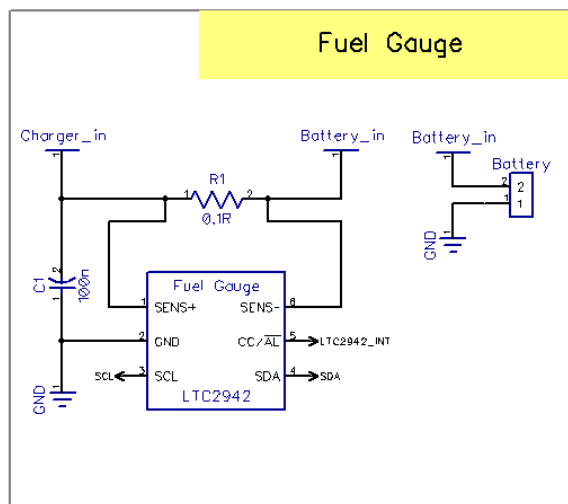
Pomiar przepływu ładunku jest wykonywany poprzez całkowanie mierzonego prądu.

Obliczenia te wymagają rezystora pomiarowego konwertującego prąd na napięcie mierzalne przez przetwornik ADC. Konwerter analogowo-cyfrowy wbudowany w układ LTC2942 działa w konfiguracji różnicowej z maksymalnym napięciem 50 mV, pozwala to wyznaczyć wartość rezystora pomiarowego. Dla pomiaru prądów do wartości 500 mA wartość rezystancji powinna wynosić 0,1  $\Omega$ .

Opisywany układ umożliwia również pomiar napięcia ogniwa - jeżeli wartość ta spadnie poniżej 3,0 V bateria jest rozłączana przez mikrokontroler, dzięki czemu nie ulegnie

uszkodzeniu. Przetwornik mierzący napięcie ogniwa można skonfigurować do pomiaru temperatury wewnętrznej układu LTC2942.

Przetwornik mierzący jedynie ładunek pobiera maksymalnie 100  $\mu\text{A}$ , lecz załączenie pomiaru napięcia lub temperatury zwiększa pobór prądu do 420  $\mu\text{A}$  przez czas trwania pomiaru tzn. maksymalnie 15 ms. Zasilanie układu odbywa się przez linię pomiarową, zgodnie z schematem połączenia przedstawionym na rysunku [---]. Konwerter analogowo-cyfrowy wbudowany w układ posiada 14-bitową rozdzielczość, maksymalny błąd pomiaru ładunku podawany przez producenta to  $\pm 1\%$  dla temperatury ok.  $25^{\circ}\text{C}$ .



Rys [---] Schemat podłączenia układu LTC2942

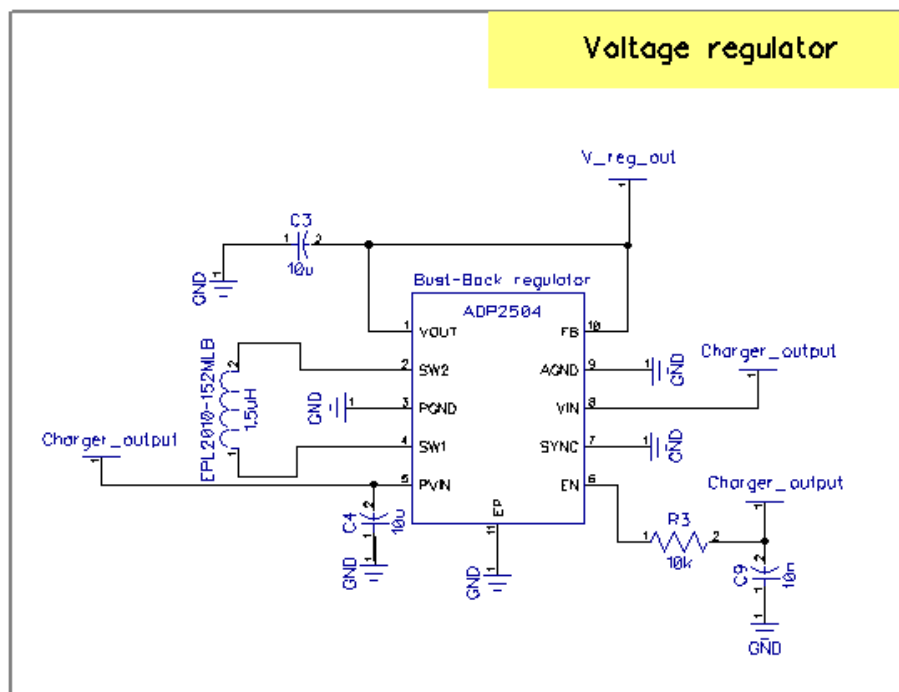
## Konwerter napięcia

W przypadku akumulatorów litowo-polimerowych przyjmuje się napięcie 3,0 V jako prób po którym ogniwo jest rozładowane kompletnie, dalszy pobór mocy powoduje nieodwracalną utratę pojemności wskutek zachodzących reakcji chemicznych. W tym projekcie przyjęto napięcie zasilające moduły na 3,3 V, dlatego też aby w pełni wykorzystać moc zgromadzoną w akumulatorze zastosowano konwerter w topologii buck-boost, które to pozwala generować napięcie ponad jak i poniżej napięcie zasilającego regulatora. Jako napięcie wyjściowe przyjęto wartość 3,3 V aby zapewnić prawidłową pracę większości zewnętrznych modułów. W przypadku modułu pobierającego dużą wartość prądu należy zastosować konwerter na minimalną wartość napięcia modułu ograniczając straty mocy.

Autor zdecydował się na przetwornice bazującą na cewce ze względu na większą wydajność tego typu rozwiązania nad przetwornicami bazującymi na kondensatorze tzw. *charge-pump*, które to cechują mniejszymi zakłóceniami elektromagnetycznymi oraz zazwyczaj mniejszymi wahaniami napięcia wyjściowego.

Jako maksymalny prąd wyjściowy modułu zasilającego przyjęto wartość 200 mA. Na bazie tego oraz powyższych założeń wybrano przetwornicę firmy Analog Devices ADP2504 [---datasheet źródło] cechuje się ona maksymalnym prądem wyjściowym 1000 mA, topologią buck-boost, częstotliwością przełączania 2,5 MHz oraz trybem wysokiej sprawności dla

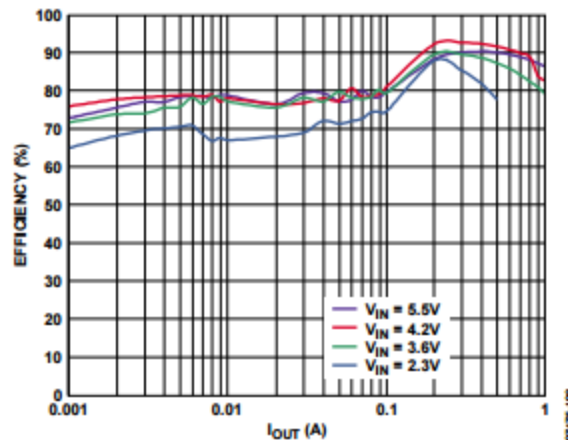
niskiego prądu obciążenia. Wbudowany tranzystor kluczujący redukuje ilość zewnętrznym komponentów do pojedynczej cewki oraz wejściowego i wyjściowego kondensatora, na rysunku [--] przedstawiono schemat podłączenia ADP2504. Analog Devices produkuje ten układ z ustawionym napięciem wyjściowym dlatego też nie wymagane są rezystory ustawiające, co dodatkowo redukuje ilość komponentów.



Rys [--] Schemat podłączenia regulatora ADP2504

Przetwornica ADP2504 zawiera wewnętrzne zabezpieczenie przeciwko zbyt niskiemu napięciu zasilania, dzięki czemu układ wyłącza się gdy napięcie wejściowe spadnie poniżej 2,1 V. Zabezpieczenie to nie chroni uszkodzeniem ogniwa wskutek znacznego rozładowania, dlatego też zastosowano cyfrową detekcję napięcia poprzez układ LTC2942. Mikrokontroler rozłączy napięcie wejściowe konwerter gdy spadnie ono poniżej 3 V. Pozostałe zabezpieczenia układu ADP2504 tzn. ochrona przed wysoką temperaturą oraz zbyt dużym prądem wyjściowym nie powinny być uaktywnione przy normalnej pracy modułu, gdzie temperatura nie powinna przekraczać kilku stopni powyżej temperatury otoczenia oraz prąd wyjściowy nie osiągnie wartości ponad 200-300 mA.

Główną cechą przemawiającą za wyborem regulatora firmy Analog Devices jest wysoka sprawność w szerokim zakresie prądu - jest ona przedstawiona na rysunku [--]. Tryb pracy PSM (power saving mode) ogranicza ilość przełączeń dzięki czemu uzyskuje się sprawność rzędu 60-80% przy niskim obciążeniu, z wyłączonym trybem PSM przetwornica posiada sprawność 30%-60% dla prądu 10 mA i 7%-15% dla obciążenia 1 mA.



Rys [--] Sprawność układu ADP2503 w trybie PSM i PWM dla napięcia wyjściowego 3,3 V

Aby wyeliminować zakłócenia elektromagnetyczne przy przełączaniu regulatora zastosowano cewkę zamkniętą w metalowej obudowie (*shield inductor coil*). Ten typ obudowy cechują się większymi wymiarami, lecz wykorzystana przetwornica pracuje na częstotliwości 2,5 MHz dzięki czemu można uzyskać wysoką sprawność przy małej indukcyjności dławika - w tym przypadku 1-2  $\mu\text{H}$ . Dla największej sprawności producent zaleca wartości 1,5  $\mu\text{H}$ . Wielkość cewki jest proporcjonalna do maksymalnego prądu i indukcyjności, która w przypadku EPL2010-152MLB wynosi: 2 mm x 2 mm (wysokość 1 mm).

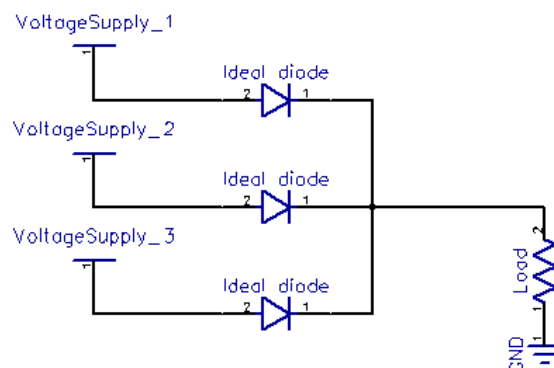
[---źródło: <http://www.coilcraft.com/pdfs/epl2010.pdf> - info o cewce]

## Układ wyboru napięcia zasilania

W przypadku gdy pojemność akumulatora w pojedynczym module zasilającym jest nie wystarczająca możliwe jest dołączenie kolejnego modułu, dzięki czemu całkowita pojemność ulegnie zwiększeniu - teoretycznie podwojeniu lecz przez straty na przetwarzanie energii i kontroli regulatora część mocy zostanie utracona. Napięcie wyjściowe każdego modułu jest generowana przez układ ADP2503, regulator ten błędem sygnału wyjściowego rzędu  $\pm 2\%$  co uniemożliwia podłączenie równoległe dwóch modułów - spowodowałoby to przepływ prądu wyrównawczego do jednego z regulatorów, uszkadzając go.

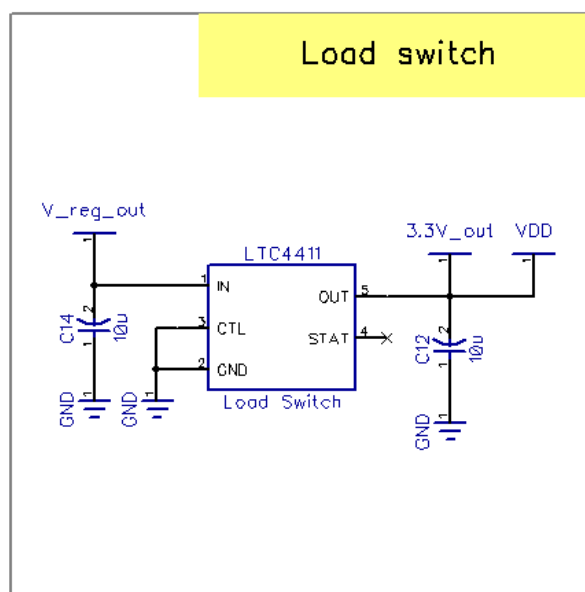
[---źródło: <https://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4411fa.pdf>]Do wyeliminowania problemu prądów wyrównawczych zastosowano układ LTC4411, który zachowuje się jak dioda idealna w konfiguracji jak na rysunku [---]. Sterownik LTC4411 łączy tranzystor MOSFET łączący wejście i wyjście układu, gdy napięcie na pinie wyjściowym jest niższe od napięcia na wejściu. Ten schemat działania łączy jako zasilanie główne zasilanie modułu zasilający o najwyższym napięciu wyjściowym, następnie gdy to źródło ulegnie rozładowaniu kolejny moduł przejmie rolę.





Rys [--] Układ połączenie kilku źródeł napięcia równolegle.

Układ ten może zostać zrealizowany na diodach Schottkiego, lecz zastosowanie dedykowanego układu eliminuje spadek napięcia na diodach. Spadek na diodach wynosiłby ok 0,3 V co przy prądzie 1 mA, daje stratę mocy 0,3 mW (dla prądu 100 mA wartość ta rośnie do 30 mW), „*ideal diode*” kontroler wymaga prądu 40  $\mu$ A przy napięciu 3,3 V co przekłada się na 0,132 mW w całym zakresie prądu wyjściowego oraz 28 mV spadku na tranzystorze i rezystorze pomiarowym powodujące spadek 28  $\mu$ W przy prądzie 1 mA i 2,8 mW dla poboru 100 mA. Układ LTC4411 wymaga tylko zestawu kondensatorów na wejściu i wyjściu oraz produkowany jest w obudowie STO23-5, dzięki czemu nie zajmuje on wiele miejsca na PCB. Schemat podłączenia tego układu w przypadku modułu zasilającego przedstawiono na rysunku [---].



Rys [--] Schemat podłączenia układu LTC4411

## Mikrokontroler

W przypadku tego modułu mikrokontroler zero gecko nadzoruje proces ładowania baterii oraz zbiera dane o jej stanie. Wykorzystany procesor firmy Silicon Labs cechuje się niskim zużyciem energii co jest kluczowe w tym module. Układ LTC2942 przekazuje dane dotyczące pobranego ładunku od momentu włączenia modułu, procesor korzystając z tych danych może wyznaczyć aktualny pobór prądu z ogniwa, różniczkując otrzymaną wartość. Z punktu widzenia pozostałych modułów urządzenie to zachowuje się jak I2C slave dysponujący następującymi rejestrami:

1. length
2. id

--dlaczego wybrano napięcie 3.3v a nie 2.5v itd.

--sprawność regulatora w funkcji napięcia wejściowego

--przebieg procesu ładowania - krzywa i nazwy rejestrów

--schemat programu blokowy

Do sterowania układem zastosowano mikrokontroler firmy Silicon Labs Zero Gecko EFM32ZG108 bazujący na architekturze ARM-M0. Układ ten posiada sprzętowe interfejsy I2C, SPI, UART lecz nie zawiera wewnętrznego przetwornika ADC lub DAC. Procesor ten cechuje się niskim zużyciem energii dzięki pracy w kilku trybach zasilania:

1. EM0 - mikrokontroler wykonuje kod użytkownika korzystając z pamięci Flash, konsumpcja energii wynosi: 114  $\mu\text{A}/\text{MHz}$  przy zasilaniu 3 V
2. EM1 - "*Sleep mode*" procesor nie wykonuje kodu, DMA, pamięć oraz interfejsy sprzętowe są dostępne i mogą pracować w trybie "*Peripheral Reflex System*" który to pozwala na asynchroniczną wymianę informacji między elementami procesora. Pobór mocy: 46  $\mu\text{A}/\text{MHz}$  przy zasilaniu 3 V.
3. EM2 - "*Deep sleep mode*" główny zegar procesora jest wyłączony, taktowanie jest zapewnione poprzez oscylator 32,768 kHz. Większość układów peryferyjnych, takich jak I2C, SPI, UART w trybie 9600 baud, działa. Prąd zasilania jest ograniczony do 0,9  $\mu\text{A}$  (zasilanie 3 V)
4. EM3 - "*Stop mode*" oscylator jest wyłączony dostępne są tylko przerywania od komparatora, I2C czy pinu wejściowego. Pobór prądu: 0,5  $\mu\text{A}$ .
5. EM4 - "*Shutoff mode*" procesor jest wyłączony jego załączenie może być wykonane poprzez przerywania na wybranych pinach wejściowych. Układ po wybudzeniu zaczyna wykonywać kod użytkownika od początku. Pobór mocy: 20 nA.