

# Sterowane cyfrowo analogowe przetwornice DC/DC w wyrafinowanych aplikacjach

*W wielu nowoczesnych, złożonych urządzeniach elektronicznych stosuje się niewielkie, analogowe przetwornice DC rozlokowane w pobliżu faktycznych miejsc poboru prądu. Te przetwornice nierzadko są centralnie zarządzane przez mikrokontrolery, które decydują o uruchomieniu lub wyłączeniu danej sekcji oraz monitorują ich parametry. Najbardziej wyrafinowane rozwiązania można znaleźć na płytach głównych komputerów PC, kart graficznych i na płytkach komputerów embedded. W takich aplikacjach korzysta się z wielu modułów regulacji napięcia, które bezpośrednio komunikują się z podzespołami pobierającymi prąd i dopasowują chwilowe napięcia czy nawet algorytm jego utrzymywania do zmieniających się warunków. Pozwala to na uzyskanie maksymalnej sprawności całego systemu, oraz wpływa na jego wydajność, a nawet niezawodność.*

Od niemal dekady, firma Microchip skupia się na tworzeniu tzw. inteligentnych przetwornic mocy i ich aplikacjach, starając się wzbogacić ich funkcję i zwiększyć ich możliwości w różnego rodzaju zastosowaniach. Jednym z głównych obszarów działań Microchipsa jest opracowywanie cyfrowych układów sterujących przetwornicami i inwerterami. Układy te bazują na mikrokontrolerach z funkcjami DSP i szybkimi peryferiami o dużej rozdzielczości lub na specjalnych kontrolerach hybrydowych, w których mikrokontrolery współpracują z analogowymi pętlami sterującymi. Przyglądając się tym rozwiązaniom da się zauważyć, że żadne z nich nie jest w pełni cyfrowe ani w pełni analogowe. Wszystko wskazuje na to, że nie da się zrealizować idealnego układu sterowania przetwornicami jedynie w oparciu o algorytmy cyfrowe lub komponenty analogowe. Systemy zasilania potrzebują zalet obu rodzajów układów, by przewyższyć wady poszczególnych z nich. Efektem tych przemyśleń i prac projektowych jest najnowsza rodzina sterowników zasilania MCP191xx, dzięki której możliwe jest tworzenie jeszcze bardziej zaawansowanych i inteligentnych systemów kontroli zasilania w różnych aplikacjach.

Pierwszym układem z rodziny MCP191xx jest MCP19111, który łączy w sobie analo-

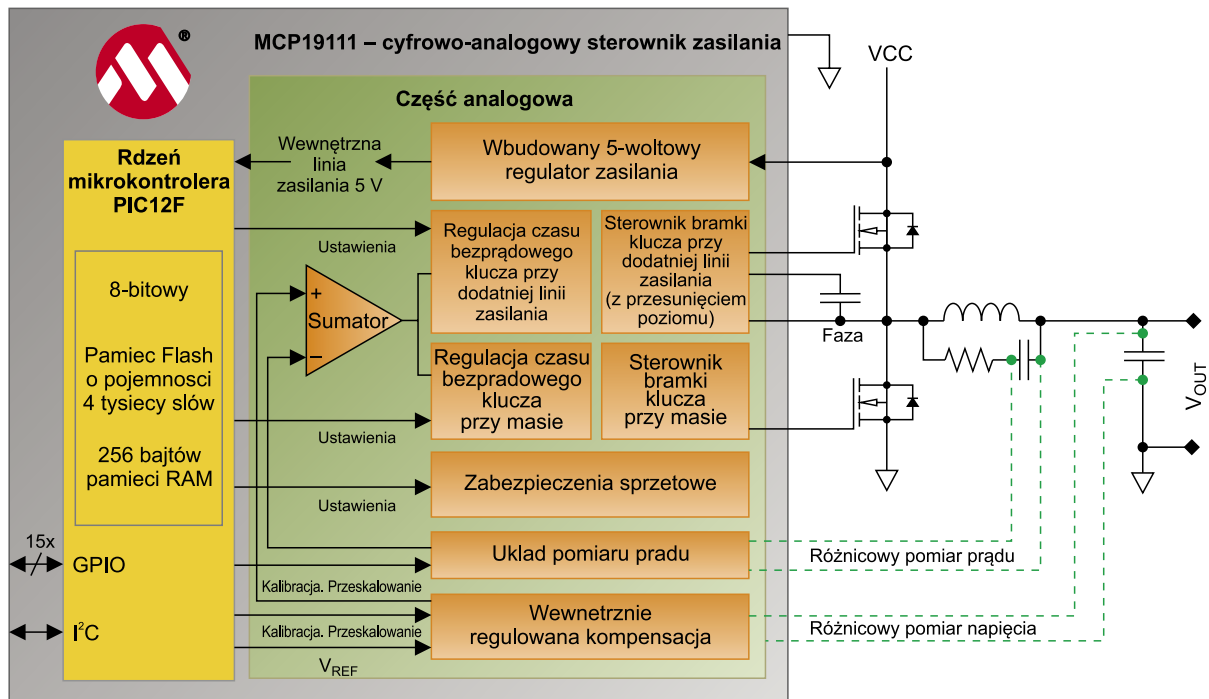
gowy, wydajny, synchroniczny sterownik przetwornicy obniżającej z 8-bitowym mikrokontrolerem – a wszystko to w postaci pojedynczego układu scalonego. Pozwala on na zaawansowaną kontrolę i monitorowanie pracy przetwornicy, a jednocześnie może się komunikować z innymi sterownikami za pomocą standardowych lub własnościowych

interfejsów komunikacyjnych, co pozwala na tworzenie większych systemów zarządzania zasilaniem. W odróżnieniu od innych hybrydowych sterowników tego typu, MCP19111 jest w pełni programowalny w języku C. Umożliwia to w pełni swobodne dopasowanie sposobu pracy sterownika do wymagań konkretnych aplikacji. Pozwala też realizować zaawansowane zadania monitorowania i łatwo implementować wszelkie nietypowe funkcje. Obsługuje przetwornice o szerokim zakresie napięć wejściowych (od 4,5 do 32 V) i o napięciu wyjściowym nawet na poziomie 0,5 V, przy prądach do 2 A / 4 A (w trybie źródła/w trybie ujęcia prądowego).

## Cyfrowe możliwości

Integracja cyfrowego kontrolera z analogowym regulatorem w pojedynczym układzie scalonym pozwala bardzo precyzyjnie sterować ich pracą. Możliwa jest m.in. bezpośrednia manipulacja obwodem kompensacyjnym, częstotliwością przełączania, czasem bezprądowym i wieloma innymi parametrami. Ponadto, dzięki temu, że mikrokontroler





Rysunek 1. Schemat blokowy układu MCP19111 wraz z przykładową aplikacją

znajduje się bezpośrednio przy regulatorze analogowym, nie ma potrzeby stosowania dodatkowych zewnętrznych układów do zasilania MCU. Da się to zaobserwować na

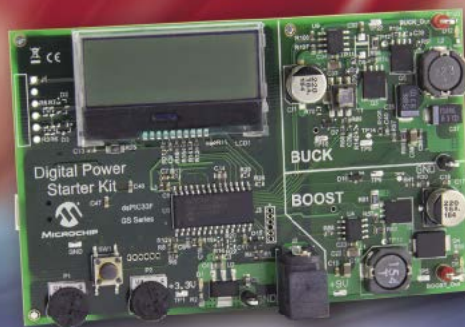
rysunku 1, na którym przedstawiono diagram blokowy MCP19111 wraz z obwodami typowej aplikacji. W sekcji analogowej znajdują się wszystkie komponenty potrzebne do

realizacji pętli analogowej. Za część cyfrową odpowiada 8-bitowy rdzeń mikrokontrolera PIC12F z 8 kB pamięci Flash i 156 bajtami pamięci RAM. Ponadto obsługuje do 15 linii

# Wygraj zestaw Microchip MPLAB Starter Kit for Digital Power



Firma Microchip organizuje konkurs dla czytelników Elektroniki Praktycznej, w ramach którego nagrodą jest zestaw MPLAB Starter Kit for Digital Power (numer produktu: DM330017) o wartości około 570 zł brutto. Zestaw ten pozwala w łatwy sposób odkrywać i testować możliwości układów z rodziny dsPIC33F GS. Zestaw umożliwi na cyfrową regulację zasilania i zawiera po jednej niezależnej stałoprądowej synchronicznej przetwornicy obniżającej i podwyższającej. Każda z przetwornicy zawiera sterowane MOSFET-em obciążenie rezystancyjne o mocy 5 W. Ponadto zestaw ma zintegrowane obwody do programowania i debugowania kodu przez USB, czujnik temperatury oraz wyświetlacz, na którym można prezentować np. aktualne wartości napięć, prądów, temperatury i informacje o błędach.



## MPLAB® Starter Kit for Digital Power (Part # DM330017)

W zestawie dostarczany jest program z zaimplementowanym algorytmem PID, który umożliwi utrzymywanie poziomu napięcia na zadanej wartości. Wbudowany mikrokontroler pozwala na przetwarzanie sygnałów analogowych, na cyfrowe, generowanie sygnału PWM, porównywanie sygnałów analogowych oraz obsługuje wiele wejść i wyjść ogólnego przeznaczenia, dzięki czemu nie ma potrzeby by realizować te funkcje za pomocą zewnętrznych obwodów.

Aby otrzymać omawiany zestaw, wystarczy zgłosić swój udział w konkursie poprzez rejestrację na stronie <http://www.microchip-comps.com/ep-digpow>

wejść i wyjść, z których 8 mogą też służyć jako wejścia analogowe, jedna umożliwia komunikację szeregową I<sup>2</sup>C/SMBus, trzy mogą pracować jako linie timerów, a pozostałe jako wejścia przerwań (rysunek 1).

Wiele z sygnałów wewnętrznych (napięcie wejściowe, wyjściowe, itp.) związanych z pracą układu analogowego również może być monitorowane, bez potrzeby montażu dodatkowych, zewnętrznych czujników. Cyfrowa implementacja pozwala nawet na odczyt aktualnego współczynnika wypełnienia w przetwornicy, co jest bardzo przydatną funkcją, dotąd dostępną tylko w pełni cyfrowych sterownikach.

### Maksymalizacja sprawności

Poza zwiększeniem możliwości monitorowania przetwornic, integracja cyfrowego rdzenia pozwala też na bezpośredni dostęp do wielu parametrów układu analogowego, które w klasycznych aplikacjach albo są w ogóle niedostępne, albo można je wprowadzić tylko jednokrotnie poprzez odpowiedni dobór zewnętrznych komponentów. Przykładowo, układ MCP19111 pozwala na dobieranie czasu bezprądowego, ustawianie programowych kompensatorów, kalibrację wewnętrznego sprzężenia zwrotnego, programowe ustawianie wartości granicznych, a nawet na przełączanie z trybu stabilizacji prądowej na napięciową.

W synchronicznych przetwornicach obniżających, długość czasu bezprądowego ma znaczący wpływ na całkowitą sprawność systemu. W przetwornicach analogowych, jeśli w ogóle umożliwiają one na samodzielny dobór tego parametru, projektant zmuszony jest do przyjęcia najgorszego scenariusza, tj. pracę w najwyższych temperaturach i przy największym obciążeniu, w którym to czas bezprądowy musi być maksymalnie wydłużony. Ustawienie tej wartości odbywa się najczęściej poprzez wlotowanie odpowiednich kondensatorów lub rezystorów, a więc dobrane wartości są stałe i nieoptymalne dla wszelkich warunków pracy, poza najtrudniejszymi, w których prawdopodobnie układ praktycznie nigdy się nie znajdzie.

Dobrym rozwiązaniem byłoby automatyczne dopasowywanie czasu bezprądowego do aktualnych warunków temperaturowych i obciążenia. Niestety, zamontowanie na PCB detektora zmiany polaryzacji napięcia wiąże się z dużymi trudnościami. Po pierwsze, wszystkie tego typu detektory bazują na komparatorach, a najszybsze komparatory analogowe, dostępne w rozsądnym zakresie cen, wprowadzają opóźnienia rzędu 15-20 ns. Jak widać na rysunku 3, jest to zbyt duży czas, by uzyskać bardzo dobre rezultaty.

Po drugie, detektory te musiałyby pracować zaraz przy szybko przełączanym kluczu, którego wpływ należałoby odfiltrować, co wprowadzałoby dodatkowe opóźnienia spr-

Dla  $I_{OUT}$ ,  $V_{OUT}$  i  $V_{IN} = \text{const.}$

$$(I) \quad \frac{P_{out}}{P_{in}} = \eta \Rightarrow \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot I_{in}} = \eta$$

Stale, jeśli pętla kontrolna działa poprawnie

Prąd wejściowy jest odwrotnie proporcjonalny do sprawności

$$(II) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{t_{on}}{T} \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot T \cdot \frac{1}{\eta} = t_{on}$$

Czas przewodzenia jest odwrotnie proporcjonalny do sprawności

$$(III) \quad \Rightarrow t_{on} = c \cdot \frac{1}{\eta} \quad \text{przy czym} \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot T = \text{const.}$$

Rysunek 2. Podstawowe wzory związane z minimalizacją zużycia mocy poprzez zmianę czasu bezprądowego

wiając, że cały detektor przestałby spełniać swoją rolę.

W tej sytuacji korzystne jest użycie rozwiązania cyfrowego, w którym monitoruje się i analizuje warunki pracy przetwornicy i czeka, aż się ustabilizują. Gdy stan ten zostanie uzyskany, można dokonać zmiany długości czasu bezprądowego i monitorować współczynnik wypełnienia sygnału kluczującego tranzystor umieszczony od strony linii dodatniej napięcia. Zgodnie z teorią, przy ustalonych warunkach, maksymalną sprawność uzyskuje się, przy najkrótszym czasie, w trakcie którego wspomniany tranzystor przewodzi prąd. Wynika to z wzorów zestawionych na rysunku 2.

Omawianą zależność pokazano na rysunku 3. Przedstawia on zmierzoną długość czasu przewodzenia klucza umieszczonego przy dodatniej linii zasilającej (czerwona krzywa) przy długości czasu bezprądowego (zielona linia) dla zadanych, ustalonych warunków pracy przetwornicy. Czarna, przerywana linia to aproksymacja trzeciego rzędu dla zmierzonych wartości.

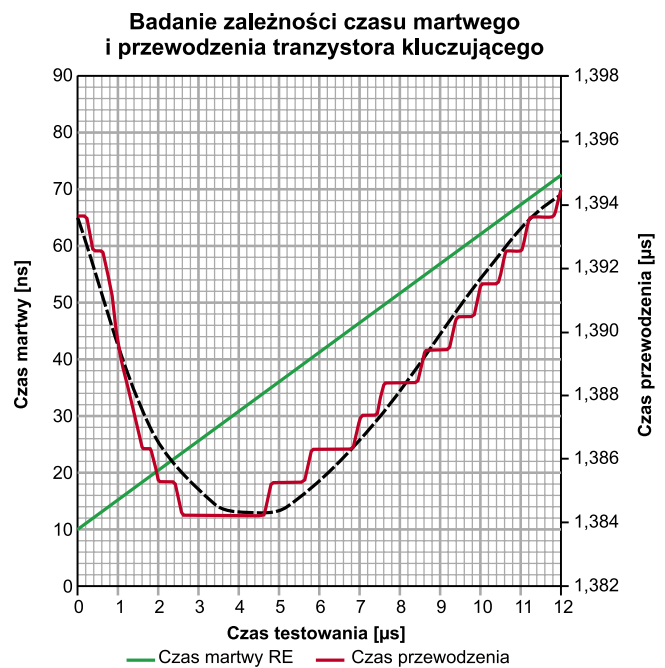
Zakres wartości czasu bezprądowego, dla którego dokonano pomiarów został dobrany tak, by obejmował dopuszczalne wartości graniczne. Badania przeprowadzono z rozdzielczością 4 ns, przy 90% obciążeniu ( $V_{we} = 12$  V,  $V_{wy} = 3,3$  V,  $I_{wy} = 9$  A). Skrajna, lewa strona wykresu odpowiada sytuacji, w której czas bezprądowy jest tak krótki, że występuje moment, w którym przewodzą jednocześnie oba tranzystory kluczujące, zwieryając część prądu z linii dodatniej bezpośrednio do masy. Minimalny czas przewodzenia tranzystora zlokalizowanego przy dodatniej linii zasilania

wynosi 1,384  $\mu$ s i można go uzyskać przy czasie bezprądowym o wartości ok 30 ns.

W przypadku rozwiązania, w którym czas bezprądowy byłby ustawiony na stałe, miałby on zapewne (dla zapewnienia niezawodnej pracy we wszelkich dopuszczalnych warunkach) wartość w okolicach 70 ns, w związku z czym czas przewodzenia wspomnianego tranzystora wyniósłby około 1,395  $\mu$ s. Zgodnie z równaniem III z rys. 2, ta 11-nanosekundowa różnica pomiędzy czasem optymalnym, a dobranym dla najtrudniejszych warunków skutkuje zmianą sprawności całej przetwornicy na poziomie 0,9%. Na pierwszy rzut oka wydaje się to bardzo niewiele, ale jeśli wziąć pod uwagę to, jak trudno jest zwiększać sprawność nowoczesnych układów zasilających, uzyskanie wzrostu z 92% do 93% stanowi już pewne osiągnięcie.

### Regulowana częstotliwość kluczowania i obwody kompensacyjne

Bardzo przydatną cechą omawianych układów jest możliwość programowej regulacji



Rysunek 3. Pomiar długości czasu przewodzenia klucza zlokalizowanego przy dodatniej linii zasilania, oraz czasu bezprądowego dla zadanych, ustalonych warunków pracy przetwornicy



**Rysunek 4. Narzędzie do konfigurowania układu MCP19111**

częstotliwości kluczkowania tranzystorów przetwornicy oraz parametrów obwodów kompensacyjnych. Nie tylko ułatwia to dobieranie podstawowych ustawień na etapie prototypowania projektowanego urządzenia, ale pozwala też na dostosowanie sposobu kompensacji w trakcie pracy układu, co prowadzi do zwiększenia całkowitej sprawności zasilacza. Jak dotąd, takie możliwości miały tylko w pełni cyfrowe układy zasilające.

W synchronicznych przetwornicach obniżających, większość strat mocy związana jest z przełączaniem tranzystorów kluczkujących. Aby zwiększyć sprawność, szczególnie przy małych obciążeniach, warto obniżyć częstotliwość kluczkowania. Jednak, gdy częstotliwość ta spada, spada też skuteczność obwodów kompensacyjnych. Ich wpływ maleje, a ponadto mogą się rozszynchronizować i przestać pełnić swoje funkcje. Aby tego uniknąć, konieczne jest dostosowanie parametrów obwodu kompensacyjnego – m.in. poprzez zwiększenie jego wzmocnień. MCP19111 pozwala programowo sterować parametrami sygnału piłokształtnego (amplitudą i czasem narastania) używanego do kompensacji, częstotliwością rezonansową oraz całkowitym wzmocnieniem obwodu kompensacyjnego. Ponadto, zawiera rejestry umożliwiające określenie offsetu wzmocniaczy i wzmocnienia sygnału prądowego, używanych w obwodzie kompensacyjnym. O ile sensowne zaprogramowanie algorytmu dobierającego te wartości może wymagać przeprowadzenia skomplikowanej analizy, daje szansę na uzyskanie znacznego wzrostu sprawności zasilacza, szczególnie dla niższych obciążeń, oraz zwiększa jego stabilność.

### Optimalizacja dla bardzo małych obciążeń

W przetwornicach obniżających asynchronicznych, straty mocy na diodzie usprawniającej są względnie duże ze względu na wciąż

występujące, niemalże napięcie na przewodzeniu na tej diodzie. Dlatego dosyć często stosuje się równolegle podłączony tranzystor, o znacznie niższym napięciu przewodzenia, który w efekcie zaczyna pracować jak synchroniczny prostownik. Technika ta jest powszechnie używana, w zasilaczach o obciążeniach powyżej 1 A. Jednakże, przy małych obciążeniach, moc potrzebna do otwarcia tranzystora wspomagającego pracę diody jest większa niż zaoszczędzona na stratach związanych z pracą diody usprawniającej.

Układ MCP19111 został przygotowany, by umożliwić dalsze usprawnienia poprzez wprowadzenie tzw. trybu emulacji diody, w którym obwód sterujący bramką tranzystora kluczującego podłączonego od strony masy jest wyłączony. Wtedy to, brak polaryzacji bramki sprawia, że wewnętrzna dioda MOSFETu zaczyna działać jak prostownik, minimalizując tym samym straty mocy.

Warto dodać, że opisane straty mocy można jeszcze bardziej ograniczyć poprzez zastosowanie nowej rodziny tranzystorów MOSFET MCP870xx o małej rezystancji przewodzenia. Dobór modelu z dużym całkowitym ładunkiem bramki jako klucza umieszczonego od strony masy zwiększa efektywność symulacji diody, dostępnej w MCP19111.

### Optimalizacja pracy przy rozwarciu

Przetwornice pracujące w trybie stabilizacji prądowej wymagają przynajmniej minimalnego prądu pobieranego przez obciążenie, by móc poprawnie działać. Gdy obciążenie przejście w tryb uśpienia i praktycznie nie pobiera prądu, przetwornica je zasilająca wciąż musi pilnować, by napięcie na jej wyjściu nie wykroczyło poza zadane granice. Dosyć często przetwornice w takiej sytuacji przechodzą w tryb, w którym na wyjściu pojawia się szybko zmieniające się, niestabilne

napięcie, które ponadto generuje zakłócenia elektromagnetyczne do otoczenia. Aby uniknąć tego problemu, MCP19111 może zostać przełączony do trybu pseudonapięciowego, poprzez wyłączenie pętli prądowej, co zwiększa stabilność całego zasilacza.

### Narzędzia

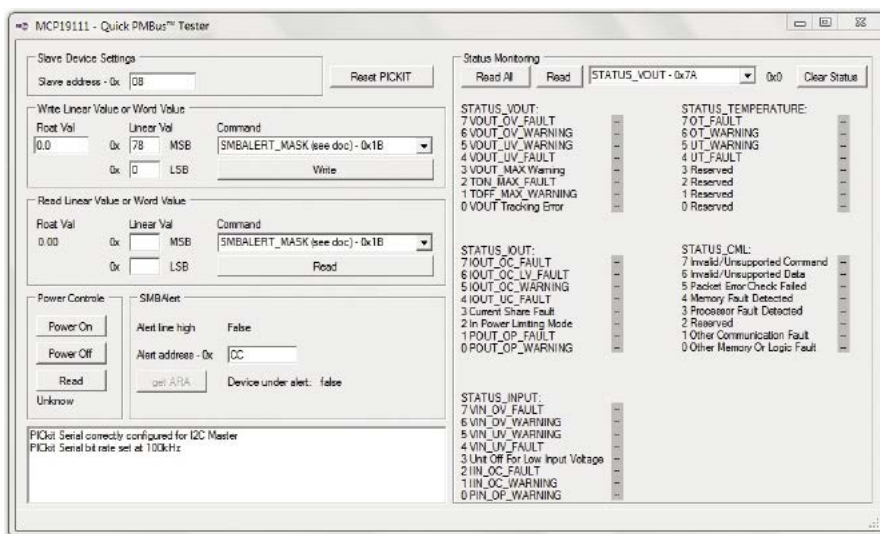
Aby móc skorzystać ze wszystkich funkcji układu MCP19111, konieczne jest użycie odpowiednich narzędzi programistycznych. Wbudowany mikrokontroler można swobodnie programować, a cały układ obsługiwany jest przez specjalne narzędzie z graficznym interfejsem użytkownika, przedstawionym na **rysunku 4**. Narzędzie to pozwala wprowadzać różne ustawienia bez konieczności samodzielnego pisania kodu. Interfejs ten działa w oparciu o firmware z otwartym kodem źródłowym, dzięki czemu możliwe jest samodzielne modyfikowanie go i tworzenie własnych, bardziej zaawansowanych programów.

Dodatkowo, Microchip dostarcza także drugie narzędzie na potrzeby testowania, które komunikuje się z MCP19111 za pomocą protokołu PMBus (**rysunek 5**). Współpracuje ono z interfejsem USB-UART/SPI/I2C Microchip PICkit Serial Analyzer i umożliwia bezpośrednie monitorowanie i debugowanie pracującego MCP19111.

### Podsumowanie

O ile większość z funkcji układu MCP19111 było dotąd znanych i można je było spotkać w różnych rozwiązaniach, omawiany układ jest pierwszym, który łączy je wszystkie w jednej, scalonej obudowie. Możliwość swobodnego programowania, niewielkie wymiary i brak potrzeby stosowania wielu dodatkowych komponentów pozwalają na tworzenie zasilaczy o niespotykanych dotąd funkcjach i parametrach.

**Andreas Reiter**  
Microchip Technology



**Rysunek 5. Narzędzie do testowania układu MCP19111**