

4-kanalowy zasilacz programowalny z STM32F429I-DISC1

Opis projektu uniwersalnego zasilacza z 4 niezależnymi kanałami wyjściowymi, z cyfrowo zadawanym napięciem i pomiarem prądu wyjściowego. Sterownik zasilacza zintegrowano z dotykowym HMI w popularnym zestawie STM32F429I-DISC1.

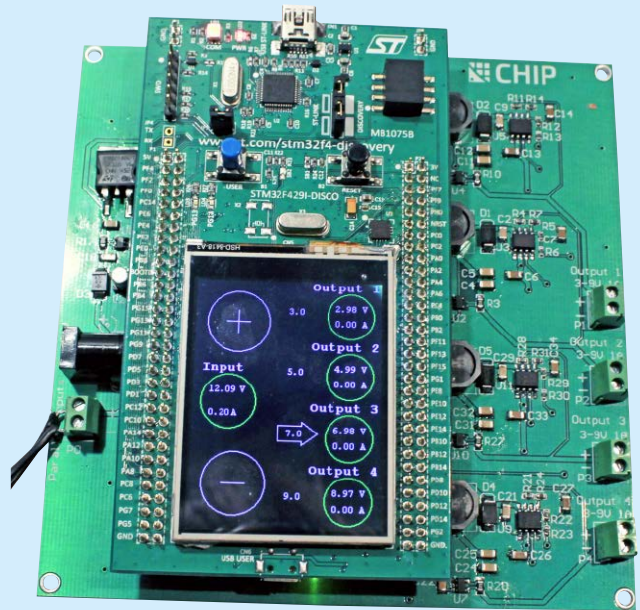
Zgodnie z założeniami, zasilacz miał mieć 4 kanały wyjściowe o niezależnie regulowanym napięciu, pamięć ostatnich nastaw, pomiar prądu wyjściowego, a całość miała być obsługiwana za pomocą panelu dotykowego na wyświetlaczu TFT. Ze względu na niską cenę i wygodę realizacji aplikacji zdecydowano się na użycie gotowego zestawu z mikrokontrolerem STM32F429 – STM32F429I-DISC1. Program dla mikrokontrolera napisano w sposób umożliwiający obsługę wyświetlacza LCD będącego wyposażeniem tej płytki oraz wykorzystanie różnych modułów funkcjonalnych mikrokontrolera, takich jak przetworniki A/C lub timery. Środowisko programistyczne, z którego korzystano przy pisaniu programu, jest dostępne bezpłatnie (System Workbench for STM32). Przydał się także program konfigurujący mikrokontrolery STM32 – CubeMX. Ułatwia on napisanie części kodu odpowiedzialnej za inicjalizację niezbędnych rejestrów.

Schemat blokowy zasilacza pokazano na **rysunku 1**.

Obwód wejściowy

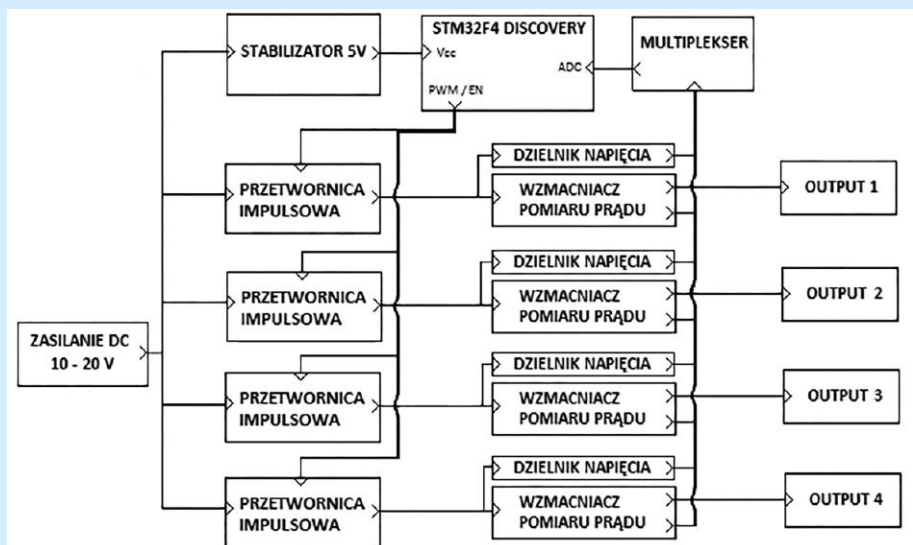
Schemat elektryczny obwodu wejściowego pokazano na **rysunku 2**. Elementy oznaczone P0 oraz J1 to dwa złącza wejściowe, połączone równolegle. Złącze P0 to typowa, dwutorowa listwa zaciskowa, natomiast J1 to złącze zasilania DC, dodane w celu poprawy wygody użytkownika urządzenia. Element D3 to dioda Schottky zabezpieczająca cały układ przed błędną polaryzacją napięcia zasilającego. Kondensatory C18 oraz C20 filtrują napięcie zasilające.

Dalsza część, składająca się z rezystora R17, układu U8 oraz kondensatora C23, odpowiada za pomiar prądu w kanale wejściowym. Płynący prąd powoduje spadek napięcia na rezystorze o małej rezystancji wynoszącej 10 mΩ. Spadek napięcia jest wartości niewielką (rzędu mV), dlatego jest wzmacniany 100× wzmacniaczem prądowym U8. Wyjście wzmacniacza jest filtrowane kondensatorem C23, zgodnie z zaleceniem noty katalogowej. Etykieta IN_C dołączono do multiplexera, który zostanie opisany dalej. Rezystory R15 i R16 tworzą dzielnik napięcia, który formuje napięcie na wejściu A/C mikrokontrolera w dopuszczalnym zakresie wartości.

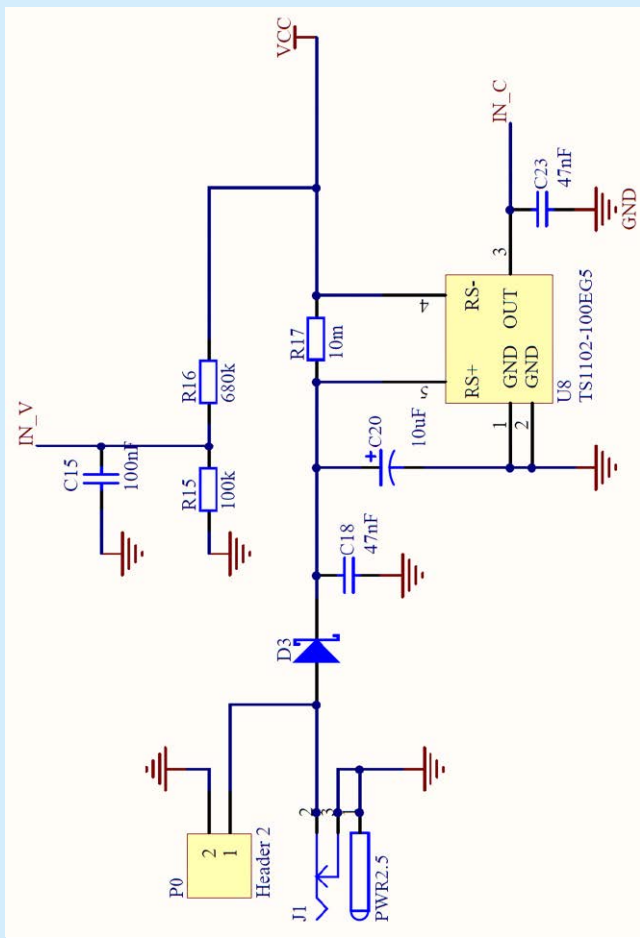


Obwody wyjściowe

Schemat elektryczny obwodu wyjściowego (jednego z czterech identycznych) pokazano na **rysunku 3**. Najistotniejszym elementem kanału wyjściowego jest przetwornica impulsowa ADP2302. Jej zasilanie zrealizowano poprzez doprowadzenie napięcia zasilania (etykieta VCC) do pinu VIN poprzez kondensator filtrujący C6 oraz połączenie pinu GND z potencjałem masy. Etykieta EN3 oznacza port wyjściowy mikrokontrolera – jest on połączony z wyprowadzeniem EN. Pozwala to na sterowanie włączaniem



Rysunek 1. Schemat blokowy zasilacza



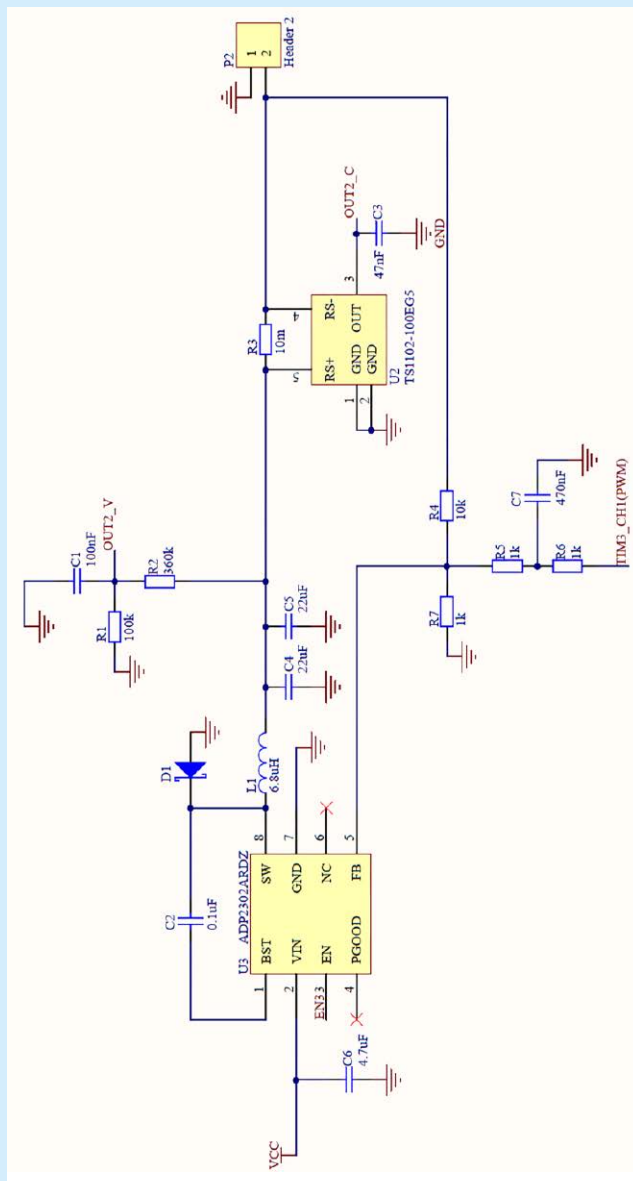
Rysunek 2. Schemat ideowy obwodu wejściowego

i wyłączaniem przetwornicy przez mikrokontroler, dzięki czemu może mieć on wpływ na wartość napięcia wyjściowego (poprzez sterowanie PWM).

Wyprowadzenie FB (*feedback*) układu ADP2302 spełnia rolę wejścia komparatora napięcia, który odpowiada za stabilizację wartości napięcia wyjściowego przetwornicy. Standardowa konfiguracja tego układu przewiduje dołączenie pinu do rezystancyjnego dzielnika napięcia wyjściowego. Domyślna konfiguracja umożliwi uzyskanie tylko jednej, ustalonej „na sztywno” wartości napięcia wyjściowego. Regulacja napięcia wymaga zastosowania potencjometru w miejsce jednego z rezystorów, ale w projekcie założyliśmy regulację cyfrową realizowaną na drodze elektronicznej.

Rozwiązanie tej kwestii przedstawiono na **rysunku 3**. Pin FB przetwornicy dołączono do dzielnika rezystancyjnego napięcia wyjściowego, złożonego z rezystorów R7 i R4. Do węzła FB przyłączono generowany mikrokontrolerem sygnał PWM (opisany na schemacie etykietą TIM3_CH1(PWM)). Ten sygnał przepuszczono przez filtr złożony z elementów rezystorów R5 i R6 oraz kondensatora C7 w celu wygładzenia go, i wytworzenia napięcia quasi stałego.

Konfigurację sygnału PWM oraz filtra można porównać działaniem do przetwornika C/A. Poprzez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału PWM jest zmieniane napięcie. Zmieniając napięcie na niższe, przetwornica jest „zmuszona” wygenerować na wyjściu napięcie wyższe, aby utrzymać w węźle FB wartość 0,8 V. Odwrotnie, zmieniając napięcie w węźle na wyższe, przetwornica na wyjściu generuje napięcie niższe. W taki sposób zrealizowano sterowanie napięciem wyjściowym przetwornicy. Konieczne było dobranie odpowiednich wartości rezystorów R4, R5, R6, R7 do zakresu napięciowego sygnału PWM, aby na wyjściu otrzymać zakres napięcia wymagany w projekcie (3...9 V).



Rysunek 3. Schemat ideowy obwodu wyjściowego

Wzór określający zależność napięcia wyjściowego od napięcia PWM i wartości rezystorów ma postać:

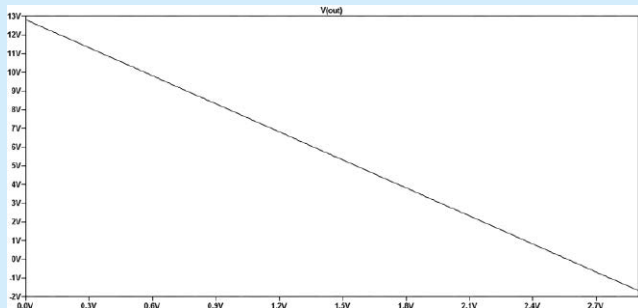
$$V_{FB} = V_{OUT} \cdot \frac{R_7 \parallel R_{56}}{R_4 + R_7 \parallel R_{56}} + V_{PWM} \cdot \frac{R_7 \parallel R_4}{R_{56} + R_7 \parallel R_4}$$

gdzie:

- V_{FB} – napięcie w węźle FB wynoszące 0,8 V.
- V_{OUT} – napięcie wyjściowe przetwornicy.
- V_{PWM} – napięcie wynikające z sygnału PWM.
- R_4, R_7 – wartości rezystorów ze schematu (rys. 3).
- R_{56} – suma wartości rezystorów $R_5 + R_6$.

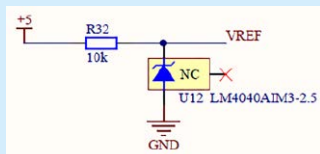
W celu ustalenia wartości rezystorów posłużono się symulacją uproszczonej wersji układu w programie LTSpice. Rezystancje R1, R2, R3 dobierano metodą prób i błędów. Zadowolające okazały się wartości, odpowiednio: 10 kΩ, 1 kΩ, 2 kΩ. Takie rezystory zastosowano w urządzeniu, a na **rysunku 4** pokazano wyniki symulacji. Stosując wybrane rezystancje uzyskano możliwość otrzymania napięcia wyjściowego z zakresu 3...9 V w zakresie napięcia sterującego od 0,7...2,6 V.

Zestaw STM32F429I-DISC1 wymaga napięcia zasilającego o wartości 5 V. Aby uzyskać takie napięcie zastosowano stabilizator liniowy. Dla zapewnienia stabilnej pracy dołączono



Rysunek 4. Wyniki symulacji

kondensatory C16 oraz C17, zgodnie z zaleceniem noty katalogowej układu. Wyjście stabilizatora (pin OUT) połączono z etykietą „+5”, którą w dalszej części schematu dołączono do pinu zasilającego płytkę STM32F429I-DISC1.



Rysunek 5. Źródło napięcia odniesienia

Podczas realizacji projektu zauważono, że napięcie referencyjne przetwornika A/C dostępne na płytce STM32F429I-DISC1 jest niestabilne. Mogłoby to skutkować błędnymi wynikami pomiarów, a w efekcie błędnym działaniem całego zasilacza. Producent płytki nie przewidział możliwości zastosowania zewnętrznego napięcia referencyjnego. Problem rozwiązano dokonując pomiaru precyzyjnego napięcia o wartości 2,5 V wytworzonego za pomocą układu będącego źródłem napięcia odniesienia (złożonego z elementów R32 oraz U12 – rysunek 5). Dokonując pomiaru tak stabilnego napięcia przetwornikiem A/C jest możliwe bieżące obliczanie aktualnego napięcia referencyjnego przetwornika według wzoru:

$$V_{REF} = \frac{V_{STAB} \cdot ADC_{RESOLUTION}}{ADC_{RESULT}}$$

gdzie:

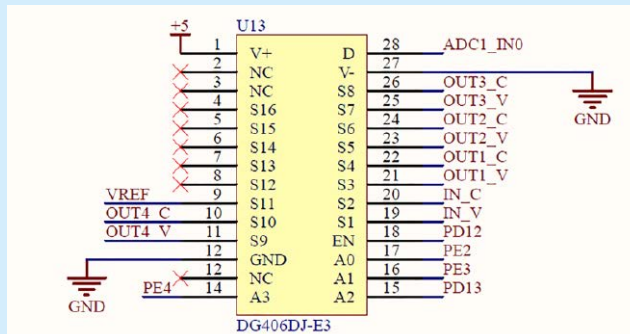
- V_{REF} – aktualne napięcie referencyjne.
- V_{STAB} – stabilne napięcie odniesienia (w tym wypadku 2,5 V).
- $ADC_{RESOLUTION}$ – rozdzielczość przetwornika A/C (w tym wypadku 4096).
- ADC_{RESULT} – aktualny wynik pomiaru napięcia odniesienia.

Wartości napięć z dzielników rezystancyjnych linii wyjściowych, napięcia z wyjść wzmacniaczy pomiaru prądów wyjściowych, napięcie zasilania stabilizatorów, sygnały PWM i napięcia pomocnicze są monitorowane przez mikrokontroler dzięki analogowemu multiplexerowi wielokanałowemu, którego wyprowadzenia z etykietami nazw sygnałów pokazano na rysunku 6. Wyjście multiplexera połączono z wejściem przetwornika A/C (etykieta ADC1_IN0). Do pinów wejściowych multiplexera podłączono sygnały pomiaru prądów, pomiaru napięć oraz pomiaru napięcia odniesienia (etykiety IN_V, IN_C, OUT1_V, OUT1_C, OUT2_V, OUT2_C, OUT3_V, OUT3_C, OUT4_V, OUT4_C, VREF).

Dla urządzenia zaprojektowano dwustronną płytkę drukowaną (rysunek 7), na której są umieszczone wszystkie elementy zasilacza, łącznie z zestawem STM32F429I-DISC1. Wejście zasilacza układu umieszczono z lewej strony obwodu, w centralnej części PCB umiejscowiono dwa gniazda stykowe żeńskie (dwurzędowe), w których jest montowany zestaw STM32F429I-DISC1. Obwody wyjściowe umieszczono z prawej strony PCB.

Oprogramowanie

Podczas pisania oprogramowania korzystano z dwóch środowisk programistycznych. Pierwsze z nich to System Workbench for STM32 – darmowe środowisko programistyczne oparte o Eclipse.



Rysunek 6. Wyprowadzenia multiplexera analogowego

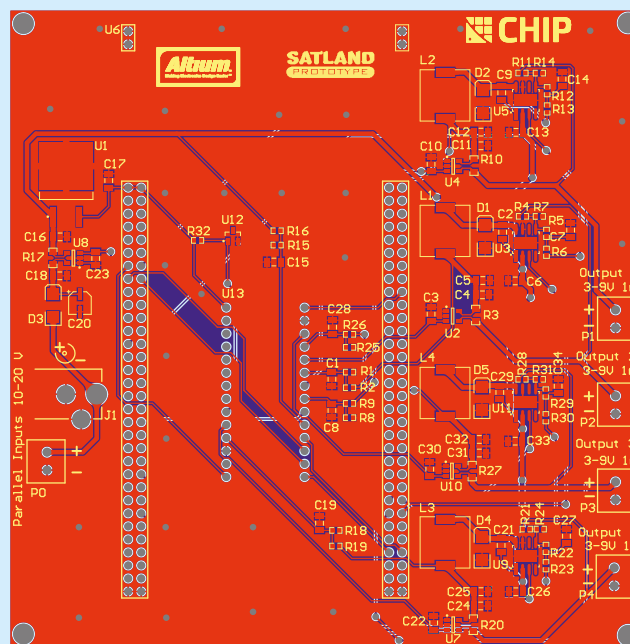
Środowisko to obsługuje wszystkie mikrokontrolery z rodziny STM32 i powiązane z nimi płytki.

Drugim używanym oprogramowaniem jest STM32CubeMX – konfigurator graficzny, pozwalający na generowanie części inicjalizacyjnej kodu dla mikrokontrolera w C. Generowany kod zawiera odwołania do bibliotek, główną funkcję programu oraz funkcje zawierające rejestry peryferiów mikrokontrolera (wcześniej wybranych). Proces ten znacznie oszczędza czas i pracę programisty. Typowe podejście z czytaniem noty katalogowej układu zabierałoby wiele godzin żmudnej pracy.

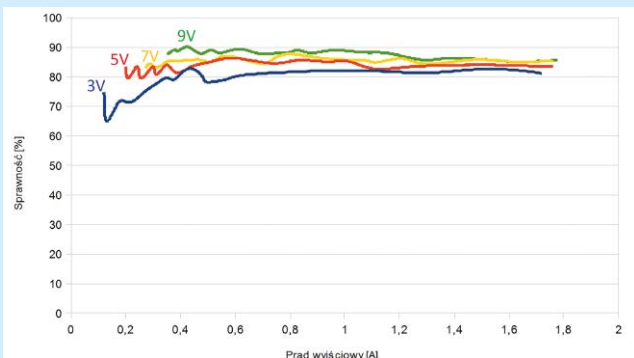
Pisząc oprogramowanie korzystano z biblioteki HAL. Biblioteka ta zawiera kompletny zestaw gotowych do użycia interfejsów programistycznych (API), które upraszczają inicjalizację i konfigurację peryferiów.

W projekcie użyto następujące peryferia mikrokontrolera:

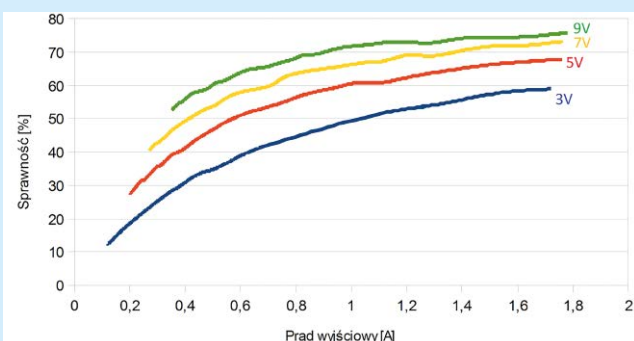
- DMA2D (Direct Memory Acces 2D) – umożliwia korzystanie z grafiki 2D jako interfejsu użytkownika, jednocześnie ograniczając implikacje w zakresie podstawowej wydajności procesora.
- LTDC (LCD-TFT Controller).
- TIM (timery 1, 2, 3, 5, 9) – używane do generowania sygnału PWM oraz obsługi przerwań.
- ADC1 – 12-bitowy przetwornik, używany do dokonywania pomiarów napięć oraz prądów.
- FMC.
- I²C.
- SPI.
- DMA.



Rysunek 7. Płytkę drukowaną przetwornicy



Rysunek 8. Sprawność przetwornicy



Rysunek 9. Sprawność całego zasilacza

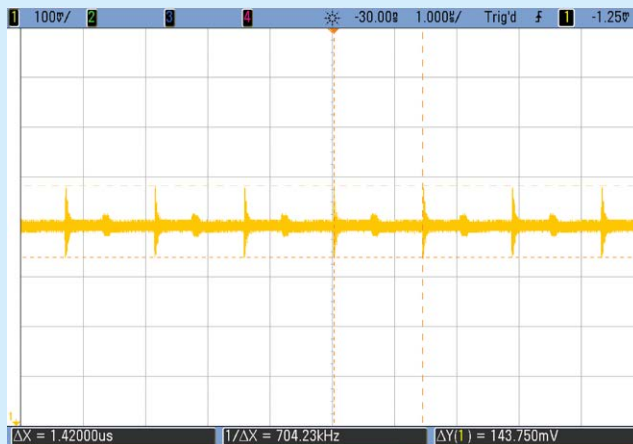
- GPIO (General Purpose Input Output).
- NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller).
- RCC (Reset and Clock Control).

Pomiary za pomocą A/C dokonują się z częstotliwością wynikającą z przerwań (4,5 kHz). Przetwornik na swoim wejściu otrzymuje wartości analogowe napięcia z układu zasilacza i zamienia je na wartości cyfrowe, na których dokonywane są obliczenia matematyczne. Wyliczone, aktualne wartości napięć i prądów są na bieżąco wyświetlane na LCD. Odświeżanie wyświetlacza dokonuje się w takt podzielonej częstotliwości przerwań. Następnie porównywane są wartości napięcia zmierzonego oraz wybranego przez użytkownika (zapisanego w pamięci). W zależności od tego czy wartości są jednakowe, czy się różnią jest generowany odpowiedni sygnał korygujący (PWM). Jeżeli napięcie wybrane przez użytkownika zgadza się z aktualnym (generowanym przez zasilacz), wtedy sygnał PWM pozostaje bez zmian. Jeżeli jest inaczej, to PWM odpowiednio zmienia się do momentu, w którym porównywane napięcia wyrównają się.

Testy urządzenia

Przeprowadzając test sprawności działania przetwornicy DC/DC dokonywano pomiarów mocy wejściowej i wyjściowej zmieniając obciążenie. Pomiarów dokonywano tylko na jednym z kanałów wyjściowych ponieważ kolejne są identyczne. Sprawność liczone zgodnie z wzorem:

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \cdot 100$$



Rysunek 10. Oscylogram napięcia wyjściowego

gdzie:

- $P_0 = I_0 \cdot V_0$
- $P_1 = |P_{ON} - P_{OFF}|$
- η – sprawność przetwornicy.
- P_0 – moc wyjściowa.
- P_1 – moc wejściowa.
- I_0 – prąd wyjściowy.
- V_0 – napięcie wyjściowe.
- P_{ON} – moc wejściowa pobierana przez zasilacz, przy braku obciążenia kanału wyjściowego.
- P_{OFF} – moc wejściowa pobierana przez zasilacz, przy wystąpieniu obciążenia na kanale wyjściowym.

Licząc moc wejściową zgodnie z powyższymi wzorami liczone różnicę mocy pobieranej przy dołączonym obciążeniu i bez niego – wyniki pomiarów pokazano na **rysunku 8**. Podczas testowania napięcie zasilające wynosiło 12 V, a prąd pobierany przez zasilacz bez obciążenia wynosił 0,2 A. Wynika z tego, że moc pobierana przez zasilacz bez dołączonego obciążenia wynosi 2,4 W.

Obliczanie sprawności zasilacza, czyli sprawności całego urządzenia przebiegało w identyczny sposób, jak obliczanie sprawności samych przetwornic. Różnica polegała na tym, że przy liczeniu mocy wejściowej nie uwzględniano mocy pobieranej przez zasilacz przy braku obciążenia (przyjęto parametr $P_{OFF} = 0$ W). Wyniki pomiarów przedstawiono na **rysunku 9**.

Zbadano także tętnienia napięcia wyjściowego. Do jednego z kanałów wyjściowych podłączono oscyloskop (Agilent MSO7104B Mixed Signal Oscilloscope). Generowano napięcie 5 V przy prądzie 0,5 A. Badane tętnienia wynosiły 143,75 mV (2,5% napięcia wyjściowego). Rezultaty widoczne na oscyloskopie przedstawiono na **rysunku 10**.

Paweł Sławiński
Politechnika Gdańska

Dodatkowe informacje

Artykuł powstał na bazie pracy inżynierskiej wykonanej na WETiI Politechniki Gdańskiej pod opieką dr inż. Bogdana Pankiewicza.



sklep.avt.pl