

# Zasilacz warsztatowy (1)

Kilka lat temu opisywałem na łamach „Elektroniki Praktycznej” projekt zasilacza sterowanego cyfrowo. Ten zasilacz jest moim podstawowym zasilaczem i pracuje bezawaryjnie do dzisiaj, jednak postanowiłem zaprojektować i zbudować kolejny zasilacz, o lepszych parametrach elektrycznych, nieco prostszy w konstrukcji.

**Rekomendacje:** programowany, nowoczesny zasilacz warsztatowy, który przyda się każdemu elektronikowi (i nie tylko jemu).

## DODATKOWE MATERIAŁY NA FTP:

<ftp://ep.com.pl>

USER: 39483, PASS: 5kc7a2ku

W ofercie AVT\*

AVT-5579

### Podstawowe informacje:

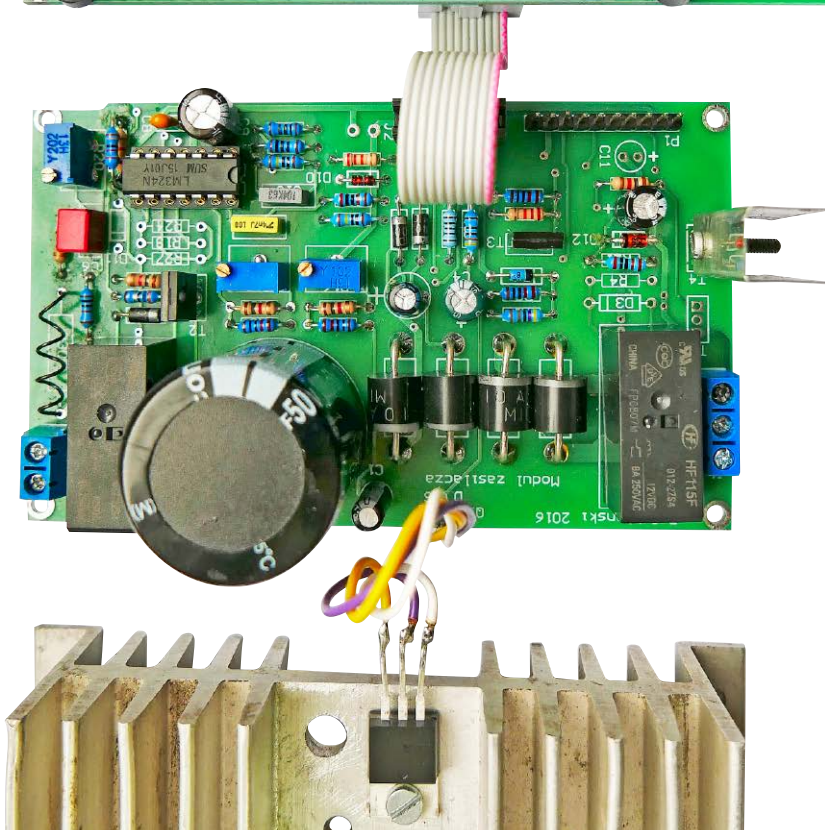
- Napięcie wyjściowe regulowane w zakresie 0...28 V DC.
- Prąd wyjściowy regulowany w zakresie 0...3 A.
- Stabilizator liniowy, analogowy z szeregowym tranzystorem regulacyjnym.
- Pomiar prądu i napięcia wyjściowego.
- Sterowanie zasilaczem za pomocą mikrokontrolera.

### Projekty pokrewne na FTP:

(wymienione artykuły są w całości dostępne na FTP)

|          |                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| AVT-1946 | Zasilacz napięcia symetrycznego z LM27762 (EP 2/2017)                               |
| AVT-1938 | Moduł zasilacza z układem KDSN05 (EP 11/2016)                                       |
| AVT-1895 | Uniwersalny moduł zasilający (EP 10/2016)                                           |
| AVT-1913 | Moduł miniaturowego zasilacza (EP 8/2016)                                           |
| AVT-5546 | Stabilizator z kompensacją spadku napięcia na przewodach połączeniowych (EP 7/2016) |
| AVT-1882 | Regulowany zasilacz napięcia symetrycznego (EP 9/2015)                              |
| AVT-1865 | Dołączany do USB zasilacz napięcia symetrycznego z układem ADP5071 (EP 8/2015)      |

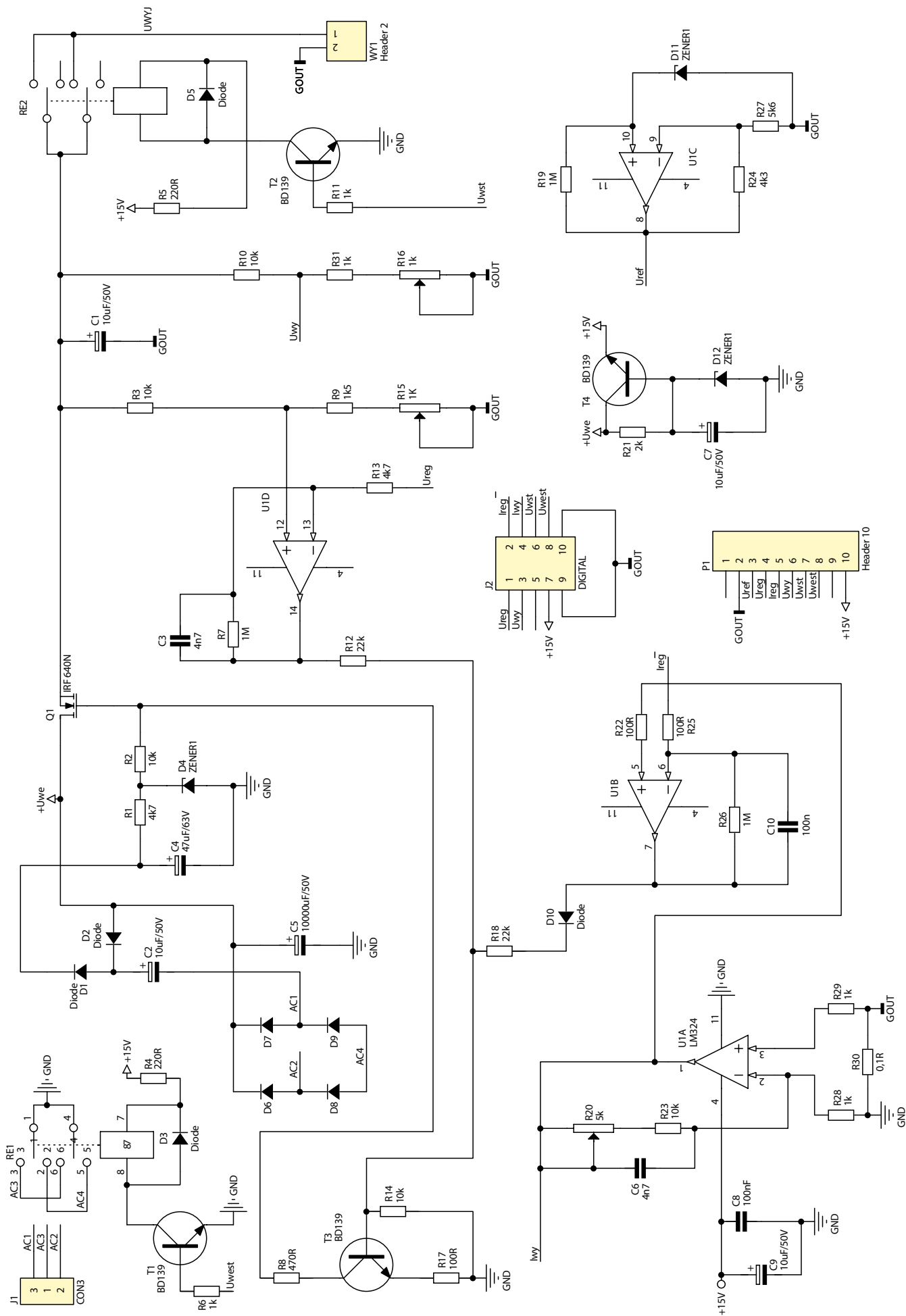
\* Uwaga:  
Zestawy AVT mogą występować w następujących wersjach:  
AVT-xxxx-UK to zaprogramowany układ. Tylko i wyłącznie. Bez elementów dodatkowych.  
AVT-xxxx-A płytka drukowana PCB (lub płytki drukowane, jeśli w opisie wyraźnie nie zaznaczono), bez elementów dodatkowych.  
AVT-xxxx-B płytka drukowana i zaprogramowany układ (czyli połączenie wersji A i wersji UK) bez elementów dodatkowych.  
AVT-xxxx-C płytka drukowana (lub płytki) oraz komplet elementów wymienionych w załączniku pdf.  
AVT-xxxx-D to nie innego jak zmontowany zestaw B, czyli elementy wstawiane w PCB. Należy mieć na uwadze, że o ile nie zaznaczono wyraźnie w opisie, zestaw ten nie ma obudowy ani elementów dodatkowych, które nie zostały wymienione w załączniku pdf.  
AVT-xxxx-ED oprogramowanie (nieczęsto spotykana wersja, lecz jeśli występuje, to niezbędne oprogramowanie można ściągnąć, klikając w link umieszczony w opisie kitu).  
Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz! (UK, A, A+, B lub C). <http://sklep.avt.pl>



Tor analogowy starszego zasilacza był zbudowany w oparciu o wysokonapięciową wersję wzmacniacza operacyjnego  $\mu A741$ . To powodowało ograniczenie napięcia wyjściowego do 24 V DC. W nowym zasilaczu zastosowałem analogowe rozwiązanie układowe niemające tego typu ograniczenia, zaproponowane przez Marka Stuarta w czasopiśmie „Everyday with Practical Electronics”. Jednak jego rozwiązanie nie było przystosowane do sterowania poprzez sterownik mikroprocesorowy, więc wartości większości elementów trzeba było przeliczyć od nowa. Z oryginalnego rozwiązania pozostała topologia poszczególnych analogowych bloków funkcjonalnych i co bardziej istotne – ogólna idea pracy zasilacza.

## Założenia konstrukcyjne

Przyjąłem, że zasilacz będzie źródłem napięcia stałego z zakresu 0...28 V o maksymalnej wydajności prądowej 3A. Założyłem też, że układ będzie sterowany przez sterownik mikroprocesorowy i będzie mierzył napięcie wyjściowe oraz prąd wyjściowy. Pomiar prądu umożliwi wykonanie regulowanego ograniczenia prądowego. Po osiągnięciu zadanej wartości prądu jest ograniczane napięcie wyjściowe. Ograniczenie prądowe zapewnia też odporność zasilacza na zwarcie. Zasilacz pracuje wtedy jako źródło prądowe bez funkcji odcięcia rozumianej jako znaczne ograniczenie prądu wyjściowego przy zwarciu na wyjściu. Układ ma być typowym



Rysunek 1. Schemat części analogowej zasilacza

### Wykaz elementów: Płytką analogową

#### Rezystory: (metalizowane 0,6 W)

R1, R13: 4,7 kΩ  
R2, R3, R10, R14, R23: 10 kΩ  
R4, R5: 220 Ω  
R6, R11, R28, R29, R31: 1 kΩ  
R7, R19, R26: 1 MΩ  
R8: 470 Ω  
R21: 2 kΩ  
R9: 1,5 kΩ  
R12, R18: 22 kΩ  
R17, R22, R25: 100 Ω  
R24: 4,3 kΩ  
R27: 5,6 kΩ  
Rpom: 0,1 Ω/5 W  
Potencjometry regulacyjne  
R15, R16: 1 kΩ potencjometr wieloobrotowy  
R20: 5 kΩ potencjometr wieloobrotowy

#### Kondensatory:

C1, C7, C9, C2: 10 μF/50 V (elektrolit.)  
C4: 47 μF/63 V (elektrolit.)  
C5: 10 mF/50 V (elektrolit.)  
C3, C6: 4,7 nF/100 V (foliowy)  
C8: 100 nF/63 V (ceramiczny)  
C10: 100 nF/100 V (foliowy)

#### Półprzewodniki:

D6...D9: diody krzemowe, prostownicze 10 A/200 V  
D1, D2, D3, D5: 1N4007  
D10: 1N4148  
D4: dioda Zenera 40 V/1,3 W  
D12: dioda Zenera 15 V/1,3 W  
D11: dioda Zenera 5,6 V/0,5 W  
Q1: IRF640N  
T1...T4: BD139-16  
U1: LM324 (DIP)

#### Inne:

Płytką drukowaną  
Listwa goldpin, raster 2,54 mm  
Złącze IDC10 męskie (lub podwójna listwa goldpinów, raster 2,54 mm)  
Radiator dla tranzystora T4

### Płytką sterownika

#### Rezystory: (SMD 1206)

R1...R5, R7: 10 kΩ  
R9, R10: 100 Ω  
R7: 1 kΩ  
R8: 10 Ω  
R6: 47 kΩ (potencjometr)

#### Kondensatory:

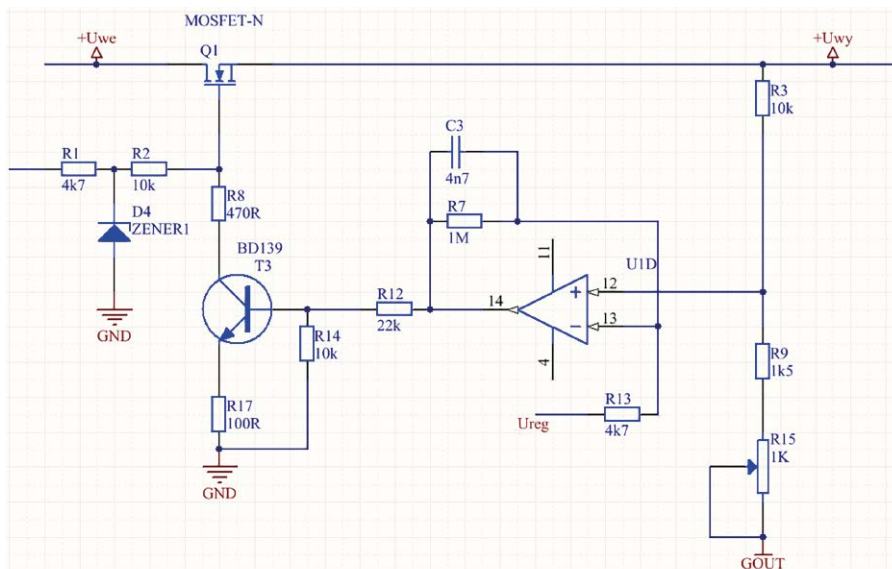
C1, C2, C5, C6, C12: 10 μF/16 V (SMD 3528)  
C4, C3: 100 nF/100 V (SMD 1206)

#### Półprzewodniki:

U1: PIC16F1769 /P (do montażu przewlekane)  
U2: SPX1117-5.0 (SOT-223)

#### Inne:

Wyswietlacz 4×20 znaków typu RC2004A-  
-BIW-ESX lub podobny ze sterownikiem ST7066U  
Impulsator z przyciskiem  
Listwa goldpin, raster 2,54 mm  
Złącze IDC10 męskie (lub podwójna listwa goldpinów, raster 2,54 mm)



Rysunek 2. Schemat regulatora napięcia

stabilizatorem analogowym z szeregowym tranzystorem regulacyjnym.

Całe urządzenie zostało funkcjonalnie i konstrukcyjnie podzielone na dwie części: układ analogowy zasilacza i układ sterownika mikroprocesorowego. Jednocześnie układ analogowy został tak skonstruowany, by mógł pracować bez sterownika. Elementami regulacyjnymi są wtedy potencjometry (najlepiej wieloobrotowe), a do pomiaru napięcia i prądu osobne analogowe lub cyfrowe mierniki.

### Układ analogowy

Schemat bloku analogowego pokazano na **rysunku 1**. Budowa i zasada działania regulowanego, analogowego, stabilizowanego zasilacza prądu stałego jest ogólnie znana. Można w nim wyróżnić: źródło napięcia odniesienia, wzmacniacz błędów, tranzystor regulacyjny mocy. Ponadto do opisywanego zasilacza dodano następujące bloki pomocnicze: blok pomiaru napięcia i prądu, blok ograniczenia prądowego, blok napięcia pomocniczego (powielacz napięcia).

Schemat regulatora napięcia pokazano na **rysunku 2**. Zasada działania tego układu jest następująca: napięcie wyjściowe ze źródła (S) tranzystora Q1, po podzieleniu w układzie dzielnika z rezystorów R3, R9 i R15 (sygnał regulacji), trafia na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego U1D. Na wejście odwracające U1D jest podawane napięcie odniesienia (referencyjne) Ureg. Wzmacniacz operacyjny U1D to komparator porównujący napięcia z dzielnika rezystancyjnego i referencyjne Ureg. W wyniku porównania powstaje sygnał błędów sterujący układem regulacyjnym zbudowanym z tranzystorów T3 i Q1. Zastosowanie tranzystora T3 powoduje, że sygnał z wyjścia U1D ma stosunkowo niskie napięcie i nie ma potrzeby stosowania wysokonapięciowych wzmacniaczy operacyjnych, jak

to było w poprzednim rozwiązaniu. Wyjściowe napięcie +Uwy jest stale mierzone i jeżeli po podzieleniu nie jest równe napięciu Ureg, to sygnał z wyjścia komparatora ma taką wartość, by tę różnicę zniwelować. Przy obciążeniu zmieniającym się dynamicznie jest wymagane, aby układ komparatora był szybki. Z drugiej strony, szybki komparator ma tendencję do wzbudzenia się. Z tego powodu trzeba ograniczyć pasmo przenoszenia układu. Do tego celu użyto obwodu RC złożonego z kondensatora C3 (4,7 nF) i rezystora R7 (1 MΩ). Kondensator C3 powinien być dobrej jakości, najlepiej foliowy.

Układ regulacji napięcia można traktować jako wzmacniacz operacyjny mocy objęty pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego poprzez dzielnik napięcia wyjściowego (R3, R9, R15). Taki układ z ujemnym sprzężeniem zwrotnym ma bardzo dobre parametry elektryczne i dlatego jest chętnie stosowany w topologiach scalonych stabilizatorów napięcia i w zasilaczach wykonywanych z elementów dyskretnych.

Napięcie na wyjściu można wyliczyć z zależności  $U_{wy} = U_{reg} \times (1 + R3/(R9 + R15))$ . Dzielnik napięcia wyjściowego obliczmy następująco:

Zakładamy, że napięcie referencyjne będzie się zmieniało w zakresie 0...4 V. Wynika to z właściwości przetworników C/A zastosowanego mikrokontrolera (będzie to wyjaśnione dalej).

Z założenia wiemy, że napięcie wyjściowe zasilacza może maksymalnie wynosić 28 V. Wzmocnienie układu

$$1 + R3/(R9 + R15) = 28/4 = 7.$$

$$R3/(R9 + R15) = 6.$$

Do wyliczenia dzielnika można użyć strony <https://goo.gl/ZvF1NU>. Ja przyjąłem R3=10 kΩ i dla podziału przez 6 suma R9+R15 jest równa 2 kΩ. Próby zastosowania dwóch łatwo dostępnych rezystorów 10 kΩ i 2 kΩ o tolerancji 1% nie dały

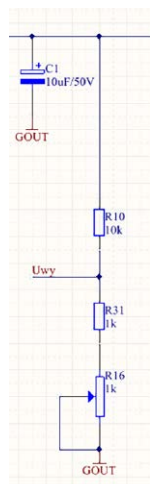


zadowalających efektów i dlatego użyto połączonych szeregowo: rezystora 1,5 kΩ i potencjometru wielobrotowego 1 kΩ.

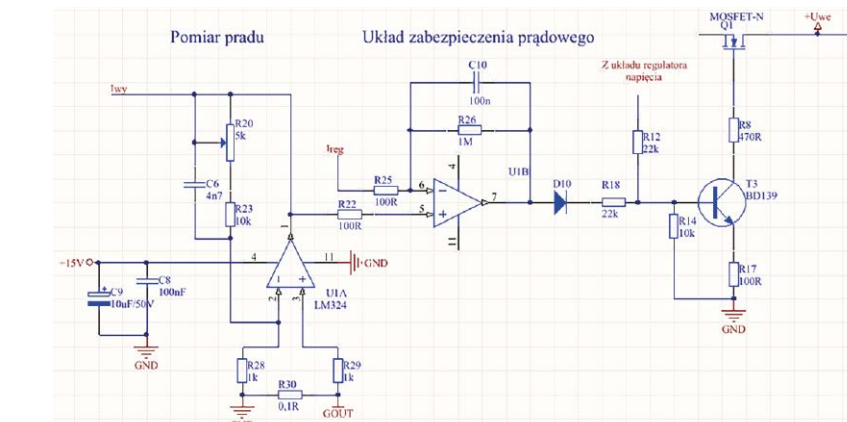
Układ pomiaru napięcia na płytce analogowej jest dzielnikiem rezystancyjnym dzielącym napięcie wyjściowe przez 7 (przy napięciu +28 V na wyjściu dzielnika występuje +4 V). Tu również zastosowałem dzielnik z potencjometrem wielobrotowym, aby dokładnie ustawić stopień podziału. Dzielnik jest zbudowany z rezystorów R10, R31 i R16 (rysunek 3). Suma wartości rezystancji R31 i R16 powinna być równa 1,66 kΩ dla R10=10 kΩ.

Napięcie Uwy jest mierzone przez przetwornik A/C mikrokontrolera sterownika. Z pomiarem prądu nie jest tak łatwo. Mikrokontroler może bezpośrednio mierzyć tylko napięcie, więc do pomiaru prądu najwygodniej jest użyć szeroko stosowanej metody technicznej polegającej na pomiarze spadku napięcia na rezystorze szeregowym. Z powodu trudności z pomiarem spadku napięcia w dodatniej gałęzi zasilacza rezystor pomiarowy R30 włączono od strony masy (rysunek 4).

Napięcie wyjściowe powinno być niezależne od spadku napięcia na rezystorze pomiarowym, więc jego próbka w układzie regulacji musi te spadki uwzględniać. Masa GOUT (pokazana na rys. 4) jest jednocześnie ujemnym biegunem napięcia wyjściowego. Dzielnik dzielący napięcie wyjściowe w układzie regulatora jest połączony z tą masą (rys. 2). Powoduje to, że napięcie wyjściowe



**Rysunek 3. Dzielnik pomiaru napięcia wyjściowego**



**Rysunek 5. Zasada działania ograniczenia prądowego**

zasilacza jest niezależne od spadku na rezystorze pomiarowym R30.

Przy pomiarze prądu metodą techniczną najlepiej, aby rezystor pomiarowy miał jak najmniejszą rezystancję. Jednak na rezystorze o małej rezystancji występuje niewielki spadek napięcia, które jest trudno zmierzyć. Przy rezystancji 0,1 Ω i maksymalnym prądzie wyjściowym zasilacza na poziomie 3 A spadek wyniesie 0,3 V. To zdecydowanie za mało, żeby można było zmierzyć bezpośrednio to napięcie przetwornikiem o zakresie pomiarowym 0...4 V. Dlatego musi być wzmacniony, aby przy prądzie 3 A mikrokontroler mierzył napięcie zbliżone do 4 V. Do wzmacnienia zastosowano wzmacniacz operacyjny pracujący w konfiguracji nieodwracającej, jak to pokazano na rysunku 4. Wzmocnienie powinno wynosić ok. 4 V/0,3 V = 13,33. Wzmocnienie wzmacniacza nieodwracającego jest wyliczane z zależności:  $K_u = 1 + (R_{20} + R_{23}) / R_{28}$ . Jeżeli dobrać rezystory, aby R11+R12/R17 było równe 12,33, to wzmocnienie całego układu będzie równe 13,33. Łatwo obliczyć, że R11+R12 = 12,33 kΩ przy R17=1 kΩ. Tu również zastosowałem potencjometr wielobrotowy 5 kΩ połączony szeregowo z rezystorem 10 kΩ.

Jest to konieczne z dwóch powodów. Po pierwsze, trudno jest znaleźć rezystor o rezystancji 12,33 kΩ, a po drugie, regulowane wzmocnienie pozwoli na skorygowanie niepewności rezystancji pomiarowej. Jak pokazała praktyka, układ z potencjometrem pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących wyników pomiaru prądu.

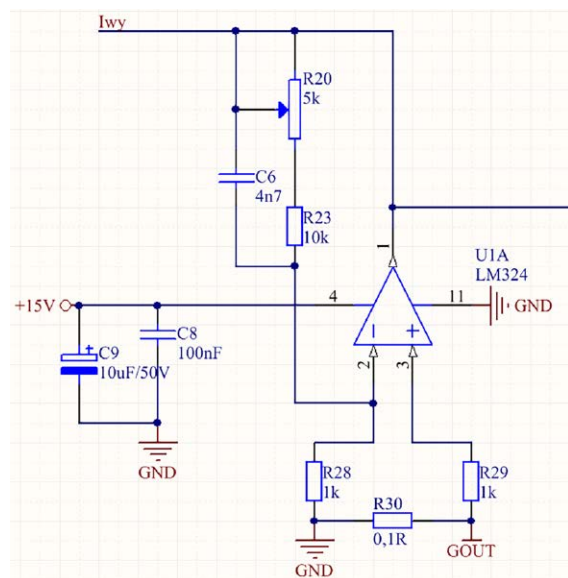
Z układem pomiaru prądu jest związany układ ograniczenia prądowego. Ograniczenie prądowe to bardzo istotna część zasilacza laboratoryjnego – prawidłowo ustawione ograniczenie może chronić zasilany układ przed zniszczeniem. Ograniczenie prądowe chroni też sam zasilacz przed skutkami zwarcia

na wyjściu zasilacza. W trakcie uruchamiania modelowego zasilacza zniszczyłem dwa tranzystory szeregowo Q1 po przypadkowym zwarciu wyjścia, kiedy układ ograniczenia nie był jeszcze włączony. Testy kompletnego zasilacza pokazały, że nawet dłuższe zwarcie na wyjściu nie powoduje uszkodzenia czy nieprawidłowego działania zasilacza.

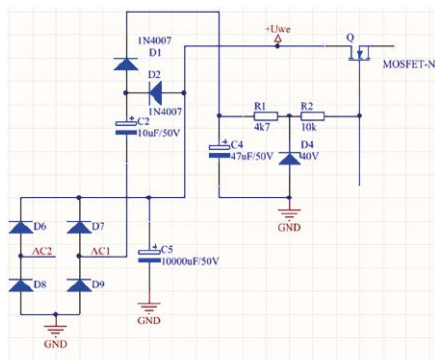
Na rysunku 5 zilustrowano zasadę działania układu zabezpieczenia prądowego. Komparator analogowy porównuje napięcie z wyjścia układu pomiaru prądu z napięciem referencyjnym Ireg określającym natężenie prądu, przy którym układ zaczyna ograniczać napięcie wyjściowe zasilacza. Kiedy napięcie z układu pomiaru prądu próbuje przekroczyć wartość napięcia Ireg, wtedy na wyjściu komparatora U1B występuje napięcie ograniczające napięcie wyjściowe zasilacza. Napięcie wyjściowe jest ograniczane do takiego poziomu, przy którym prąd nie przekroczy ustawionej wartości. Dioda D10 separuje wyjście komparatora od wyjścia układu regulatora napięcia.

Układ komparatora jest podatny na wzbudzenia i aby im zapobiec, stosuje się filtr RC: rezystor R26 i kondensator C10 w gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego. Brak kondensatora C10 lub zbyt mała pojemność powoduje powstanie sporych oscylacji o wysokiej częstotliwości w momencie zadziałania układu ograniczenia prądowego.

REKLAMA



**Rysunek 4. Obwody pomiaru natężenia prądu**



Rysunek 6. Obwody napięcia polaryzacji

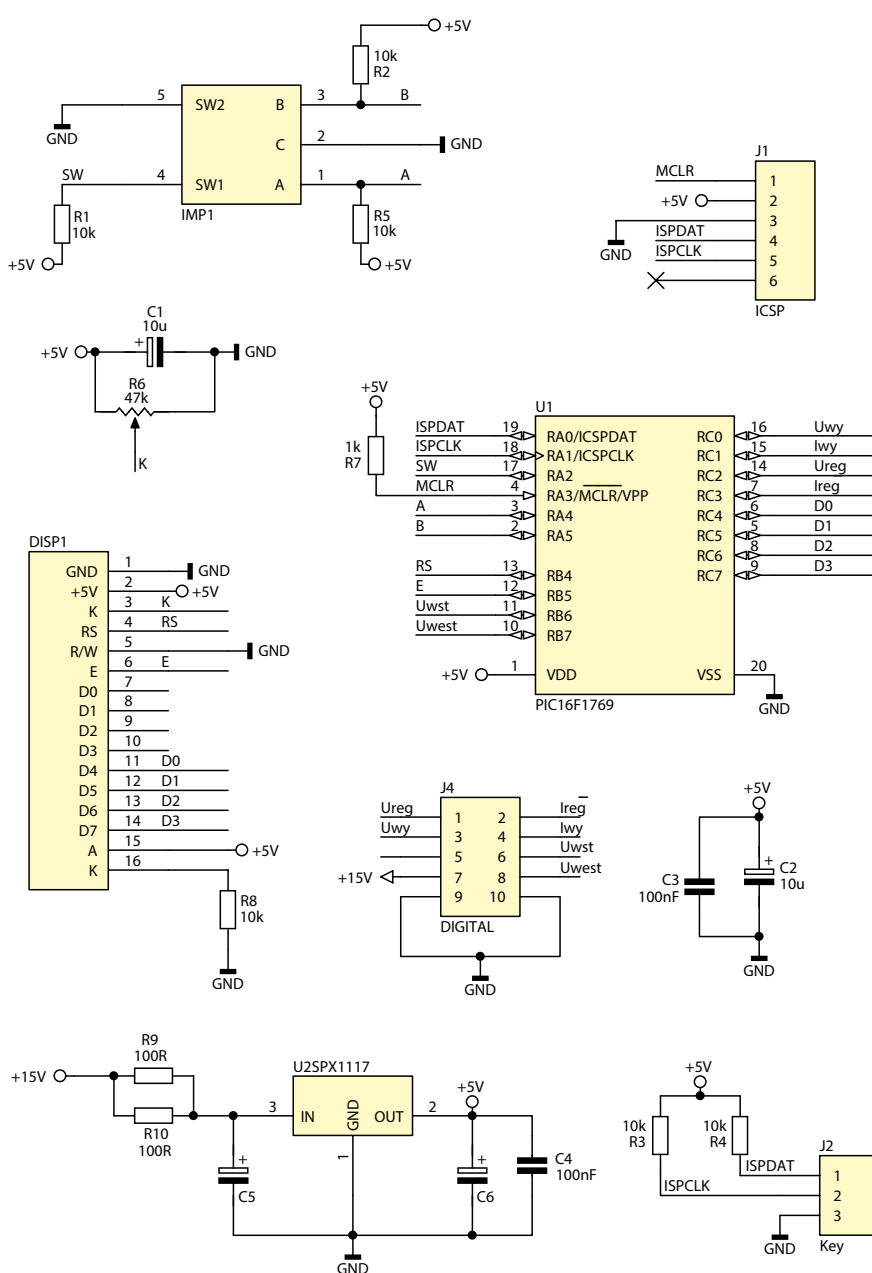
## Układy zasilające

Źródłem napięcia wejściowego  $U_{we}$  jest transformator sieciowy o mocy 100 VA i napięciu wyjściowym 32 V AC. Mostek prostowniczy składa się z czterech diod krzemowych o maksymalnym prądzie 10 A. Główny kondensator filtrujący ma pojemność 10 mF i napięcie znamionowe 50 V. Szeregowy tranzystor regulacyjny NMOS wymaga, aby napięcie na bramce (G) było o kilka woltów wyższe od napięcia źródła (S). Dla umożliwienia prawidłowej polaryzacji tranzystora zastosowano powielacz napięcia pokazany na **rysunku 6**. Napięcie z wyjścia powielacza jest stabilizowane diodą Zenera (40 V) i podawane przez rezystor R2 na bramkę tranzystora szeregowego Q1.

Do zasilania wzmacniacza operacyjnego LM324 oraz sterownika mikroprocesorowego zastosowałem stabilizator napięcia z tranzystorem BD139 i 15-woltową diodą Zenera.

## Sterownik mikroprocesorowy

Sterownik zasilacza ma za zadanie wykonać regulację napięcia wyjściowego i ograniczyć prąd obciążenia. Ponadto musi mierzyć wartość ustawionego napięcia i prąd pobierany z zasilacza. Do wykonania tych zadań będziemy potrzebowali dwóch przetworników C/A i dwóch wejść przetwornika A/C. W poprzedniej wersji zasilacza zastosowałem 32-bitowy mikrokontroler STM32F100RBT6B, głównie ze względu na wbudowane dwa przetworniki C/A – w tym zdecydowałem się na użycie mikrokontrolera PIC16F1769 firmy Microchip. Oprócz zaawansowanych cyfrowych modułów funkcjonalnych PIC16F1769 ma dwa 10-bitowe przetworniki C/A, 10-bitowy przetwornik A/C, programowane źródło napięcia odniesienia oraz wzmacniacze operacyjne. Te analogowe peryferie są w zupełności



Rysunek 7. Schemat sterownika zasilacza

wystarczające, aby zbudować sterownik zasilacza bez konieczności stosowania dodatkowych elementów w torach analogowych. Wersje PIC16F1xxx mogą być zasilane napięciem +5 V, co jest korzystne ze względu na większą odporność na zaburzenia.

Schemat sterownika pokazano na **rysunku 7**. Interfejs użytkownika stanowią: alfanumeryczny wyświetlacz LCD DISP1 mieszczący 4×20 znaków oraz impulsator IMP1 ze stykiem zwierzanym przez naciśnięcie osi. Złącze J4 (ICD10) jest przeznaczone do doprowadzenia

sygnałów sterujących analogowych i cyfrowych z płytki sterownika do płytki analogowej oraz napięcia +15 V zasilającego sterownik. Jest ono podawane poprzez połączone równolegle rezystory R9 i R10 na wejście stabilizatora U2 (SPX1117-5.0) zasilającego sterownik. Spadek napięcia na tych rezystorach jest tak dobrany, aby napięcie na wejściu U2 miało wartości ok. +12 V. Złącze J1 jest przeznaczone dla programatora PICKIT-3.

Tomasz Jabłoński, EP



[www.ep.com.pl/kap](http://www.ep.com.pl/kap)

# Zasilacz warsztatowy (2)

Kilka lat temu opisywałem na łamach „Elektroniki Praktycznej” projekt zasilacza sterowanego cyfrowo. Ten zasilacz jest moim podstawowym zasilaczem i pracuje bezawaryjnie do dzisiaj, jednak postanowiłem zaprojektować i zbudować kolejny zasilacz, o lepszych parametrach elektrycznych, nieco prostszy w konstrukcji. W pierwszej części artykułu omówiłem budowę zasilacza. Teraz czas na opisanie jego oprogramowania, które jest nietrywialne do wykonania.

## DODATKOWE MATERIAŁY NA FTP:

<ftp://ep.com.pl>

USER: 44747, PASS: 3qwdwa8u

W ofercie AVT\*

AVT-5579

### Podstawowe informacje:

- Napięcie wyjściowe regulowane w zakresie 0...28 V DC.
- Prąd wyjściowy regulowany w zakresie 0...3 A.
- Stabilizator liniowy, analogowy z szeregowym tranzystorem regulacyjnym.
- Pomiar prądu i napięcia wyjściowego.
- Sterowanie zasilaczem za pomocą mikrokontrolera.

### Projekty pokrewne na FTP:

(wymienione artykuły są w całości dostępne na FTP)

|          |                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| AVT-1946 | Zasilacz napięcia symetrycznego z LM27762 (EP 2/2017)                               |
| AVT-1938 | Moduł zasilacza z układem KDSN05 (EP 11/2016)                                       |
| AVT-1895 | Uniwersalny moduł zasilający (EP 10/2016)                                           |
| AVT-1913 | Moduł miniaturowego zasilacza (EP 8/2016)                                           |
| AVT-5546 | Stabilizator z kompensacją spadku napięcia na przewodach połączeniowych (EP 7/2016) |
| AVT-1882 | Regulowany zasilacz napięcia symetrycznego (EP 9/2015)                              |
| AVT-1865 | Dołączany do USB zasilacz napięcia symetrycznego z układem ADP5071 (EP 8/2015)      |

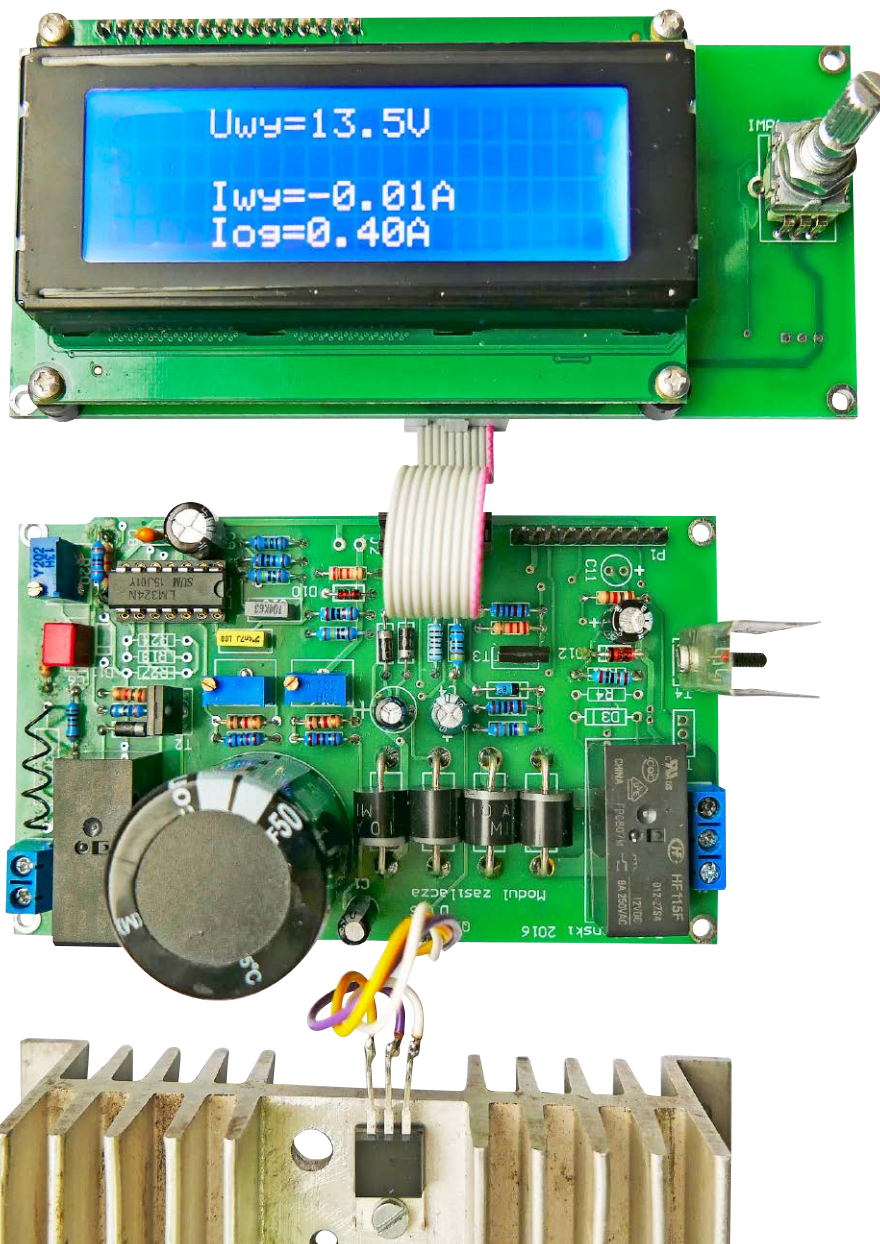
\* Uwaga! Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu.

Wymagana umiejętność lutowania!

Podstawową wersją zestawu jest wersja [B] nazywana potocznie Kitem (z ang. zestaw). Zestaw w wersji [B] zawiera elementy elektroniczne (w tym [UK] – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wylutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:

- wersja [C] zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw [B] (elementy wylutowane w płytkę PCB)
- wersja [A] płytkę drukowaną bez elementów i dokumentacja kitu w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, posiadają następujące dodatkowe wersje:
- wersja [A+] płytkę drukowaną [A] + zaprogramowany układ [UK] i dokumentacja
- wersja [UK] zaprogramowany układ

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz! <http://shlep.avt.pl>



Program sterujący napisano w środowisku MPLAB X i skompilowano bezpłatnym kompilatorem MPLAB XC8. Do konfigurowania układów peryferyjnych użyto wtyczki MPLAB Code Configurator (MCC). Wszystkie te narzędzia są dostępne bezpłatnie i można je pobrać ze strony firmy Microchip. Mikrokontroler PIC16F1769 jest stosunkowo nowy, więc trzeba użyć najnowszych wersji oprogramowania wspierających ten układ.

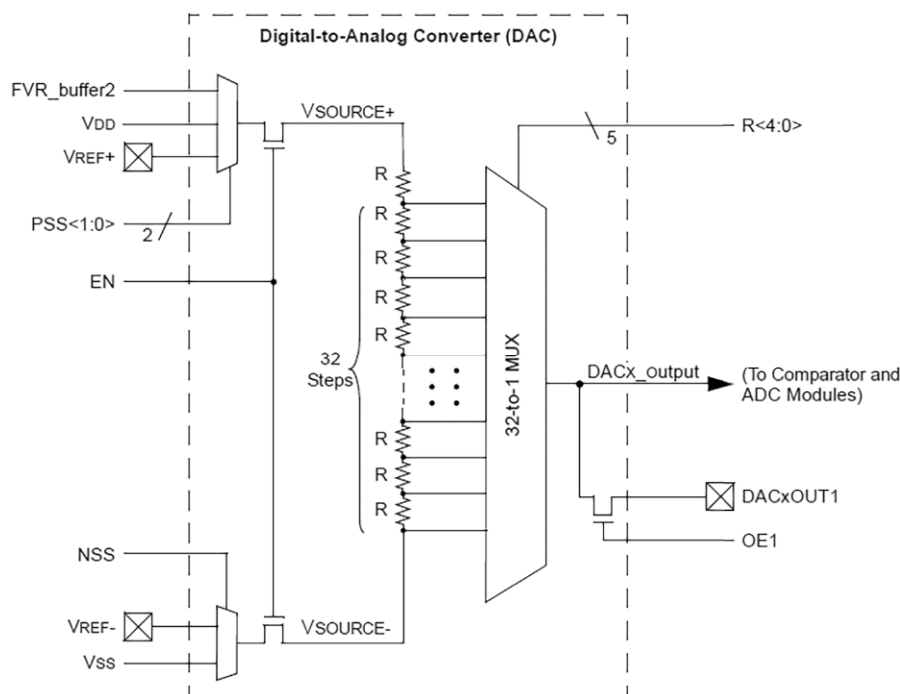
## Przetworniki C/A, źródło napięcia odniesienia i wzmacniacze operacyjne

Do regulacji napięcia i prądu wyjściowego jest potrzebne regulowane źródło napięcia odniesienia. W typowych rozwiązaniach

stosuje się stabilne (stabilizowane) źródło napięcia dzielone przez precyzyjny potencjometr. W sterownikach mikroprocesorowych funkcję regulowanego źródła napięcia referencyjnego pełni przetwornik C/A. Mikrokontroler PIC16F1769 ma wbudowane dwa 10-bitowe i dwa 5-bitowe przetworniki C/A. W sterowniku użyłem obu przetworników 10-bitowych. Jeden jest źródłem regulowanego napięcia odniesienia i służy do zmiany napięcia wyjściowego, a drugi jest źródłem regulowanego napięcia odniesienia do zmiany natężenia prądu zabezpieczenia prądowego.

Schemat blokowy przetwornika pokazano na rysunku 8. Zasadniczymi elementami modułu są drabinka rezystancyjna





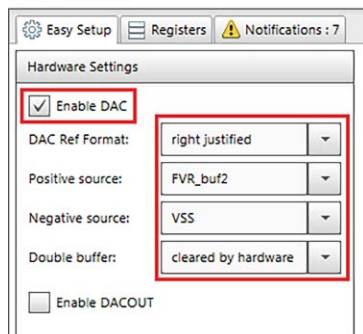
Rysunek 8. Schemat blokowy przetwornika C/A

oraz multiplekser analogowy. Drabinka jest zbudowana z rezystorów o rezystancji ok. 600  $\Omega$ . Do ostatniego, „górnego” rezystora dołączono dodatni biegun napięcia referencyjnego określającego maksymalne napięcie na wyjściu przetwornika. Napięciem referencyjnym mogą być: napięcie zasilania mikrokontrolera VDD, napięcie z zewnętrznego źródła podłączone do wyprowadzenia Vref+, napięcie z modułu FVR\_buffer2. Ujemny biegun napięcia referencyjnego jest podłączony na stałe do VSS – masy mikrokontrolera.

Przed użyciem modułu przetwornika C/A musi być skonfigurowany. Jak już wspomniałem, wszystkie moduły peryferyjne będą konfigurowane za pomocą wtyczki

MCC środowiska IDE MPALB X. Konfiguracja przetwornika cyfrowo-analogowego w MCC jest bardzo łatwa. Trzeba włączyć moduł (opcja „Enable DAC”), wybrać dodatnie napięcie referencyjne oraz odblokować wyjście napięcia na wyprowadzenie DACOUT1, jak na **rysunku 9**. W konfiguracji nie zaznaczono „Enable DACOUT”. Wyjście przetwornika zostanie wewnętrznie połączone z wejściem wbudowanego wzmacniacza operacyjnego pracującego jako bufor. W tym celu należy skonfigurować moduł wzmacniacza operacyjnego, tak aby wyjście nieodwracające było połączone z wyjściem przetwornika, jak na **rysunku 10**. Po zaznaczeniu opcji „Unity Gain Configuration” wzmacniacz zaczyna pracować

## DAC1 (10 bit)



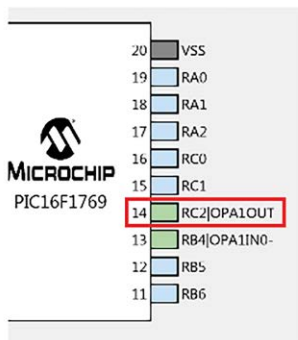
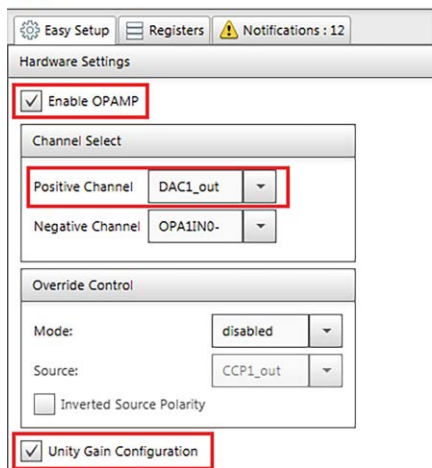
Rysunek 9. Konfiguracja modułu przetwornika DAC1 do regulacji napięcia wyjściowego

jako standardowy bufor (**rysunek 11**). Nie ma wtedy znaczenia, co zostanie wybrane jako sygnał doprowadzony do wejścia odwracającego w konfiguracji wzmacniacza operacyjnego.

Buforowanie wyjścia eliminuje wpływ impedancji obciążenia na przetwornik C/A. W konfiguracji przetwornika wybraliśmy jako napięcie referencyjne – opcję FVR\_buf2. W systemie analogowym używającym przetworników C/A i A/C trzeba się zmierzyć z problemem jakości napięcia odniesienia. Najłatwiej jest użyć napięcia zasilania jako napięcia odniesienia. Ma to jednak wady: ma ono wartość zależną od egzemplarza stabilizatora oraz zwykle jest zaszumione. Szum jest spowodowany impulsowym charakterem poboru prądu przez układy cyfrowe. Jeśli potrzebujemy zmierzyć (lub wygenerować) napięcie o przewidywanej dokładności, trzeba zastosować dodatkowe źródło napięcia odniesienia. Jeżeli napięcie na wyjściu przetwornika musi być ustawiane dokładnie, to trzeba zastosować precyzyjne źródło napięcia referencyjnego o wartości będącej jedną z potęg liczby 2 (1,024 V, 2,048 V itp.). Mikrokontroler PIC16F1769 ma wbudowany programowany moduł napięcia odniesienia mogący dostarczyć 1,024 V,

REKLAMA

## OPA1



Rysunek 10. Konfiguracja wzmacniacza operacyjnego

2,048 V lub 4,096 V. Ponieważ napięcie zasilania wynosi +5 V, użyjemy napięcia 4,096 V. Konfigurowanie modułu FVR pokazano na **rysunku 12**. Zostaną zastosowane oba bufory FVR. Pierwszy dla przetwornika A/C, a drugi dla przetwornika C/A.

W trakcie opisywania modułu analogowego wspominałem, że napięcia regulujące napięcie wyjściowe i próg zabezpieczenia prądowego będą się zmieniały w zakresie 0...4 V. Wszystkie obliczenia elementów w torach regulacji były dostosowane do takiego zakresu.

Dla napięcia referencyjnego *FVR\_Buffer2* równego 4,096 V rozdzielczość wynosi  $4,096/1024=4$  mV. Napięcie z modułu FVR jest ustawiane z niepewnością 1...2%, a niepewność samego konwertera wynosi  $\pm 1,5$  LSB. Dla naszego zastosowania jest to zupełnie wystarczające. Zapisanie do przetwornika wartości 1000 powoduje ustawienie napięcia na wyjściu wzmacniacza równego  $4\text{ mV} \times 1000 = 4$  V.

**Listing 1. Inicjalizacja modułu przetwornika DAC1**

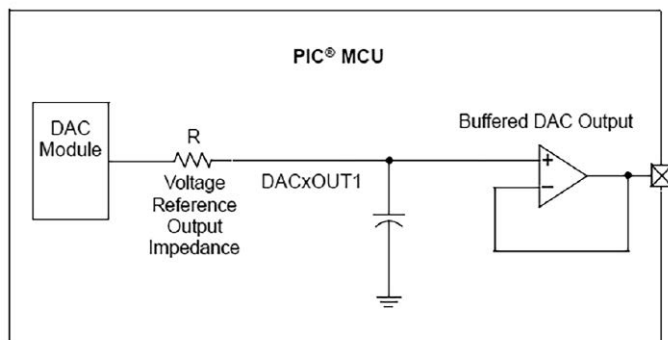
```
void DAC1_Load16bitInputData(uint16_t input16BitData)
{
    //DAC input reference range should be 16 bit
    //Input data left justified.
    DAC1CONbits.DAC1FM = 1;
    //Loading 16bit data to DAC1
    DAC1REFL = (uint8_t) input16BitData;
    DAC1REFH = (uint8_t) (input16BitData >> 8);
    //Loading DAC1 double buffer data to latch.
    DAC1_DoubleBufferLatch();
}
```

**Listing 2. Zapisanie 10-bitowych danych do przetwornika DAC1**

```
void DAC1_Load10bitInputData(uint16_t input10BitData)
{
    //DAC input reference range should be 10bit.
    //Input data right justified.
    DAC1CONbits.DAC1FM = 0;
    //Loading 10bit data to DAC1
    DAC1REFL = (uint8_t) input10BitData;
    DAC1REFH = (uint8_t) (input10BitData >> 8);
    //Loading DAC1 double buffer data to latch.
    DAC1_DoubleBufferLatch();
}
/**
 * Loads data from DAC buffer onto the DAC output
 */
#define DAC1_DoubleBufferLatch() \
    (DAC1DBits.DAC1LD = 1)
```

**Listing 3. Pętla ustawiania napięcia wyjściowego zasilacza**

```
while(1)
{
    if(frtime==1) //cykliczny pomiar napięcia i prądu
    {
        DispNap(PLV,1);
        DispPr(PL,3);
        Frame_ms(500);
    }
    kod=GetEncoder();
    if(kod==KOD_IMP_UP)
    {
        volt=volt+17,85; //zmiana o 0,5V - zwiększenie
        if(volt>1000)
        {
            volt=1000;
            DAC1_Load10bitInputData((unsigned int)volt); //zapis do DAC
            Delay_ms(80);
            DispNap(PLV,1); //zmierz i wyświetl napięcie
            DispPr(PL,3); //zmierz i wyświetl prąd
            Frame_ms(1000); //kolejny pomiar za 1 s
        }
    }
    if(kod==KOD_IMP_DWN)
    {
        volt=volt-17,85; //zmiana o 0,5V - zmniejszenie
        if(volt<35,7)
        {
            volt=35,7;
            DAC1_Load10bitInputData((unsigned int)volt); //zapis do DAC
            Delay_ms(80);
            DispNap(PLV,1); //zmierz i wyświetl napięcie
            DispPr(PL,3); //zmierz i wyświetl prąd
            Frame_ms(1000); //kolejny pomiar za 1 s
        }
    }
    if(kod==KOD_IMP_ST) //przyciśnięcie ośki - ustawienie ograniczenia prądowego
    {
        Delay_ms(200);
        SetI(); //ustawienie progu zabezpieczenia prądowego
    }
}
```



**Rysunek 11. Buforowane wyjście przetwornika C/A**

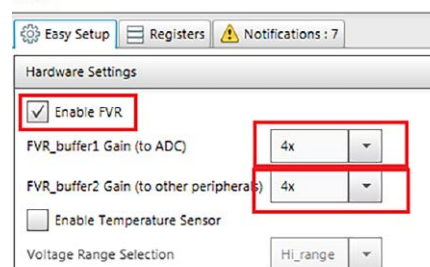
To upraszcza obliczenia, które musi wykonać mikrokontroler.

MCC generuje kilka funkcji związanych z obsługą przetwornika DAC1, z których użyjemy tylko dwóch: pokazanej na **listingu 1** *DAC1\_Initialize(void)* oraz *DAC1\_Load10bitInputData(uint16\_t input10BitData)* z **listingu 2**.

Przyjąłem, że napięcie wyjściowe będzie zmieniane z rozdzielczością 0,5 V. Wiemy

już, że maksymalne napięcie na wyjściu zasilacza wynosi 28 V i że odpowiadają mu 4 V napięcia regulującego z przetwornika C/A. Dla wygenerowania tego napięcia trzeba wpisać do rejestru przetwornika C/A liczbę 1000. Zatem zmiana na najmłodszym bicie odpowiada zmianie napięcia wyjściowego o  $28\text{ V}/1000=0,028$  V. Żeby zmienić napięcie o 0,5 V, trzeba wpisać do przetwornika wartość  $0,5\text{ V}/0,028=17,85$ . Oczywiście, nie da się wpisać do rejestru wartości 17,85.

#### FVR



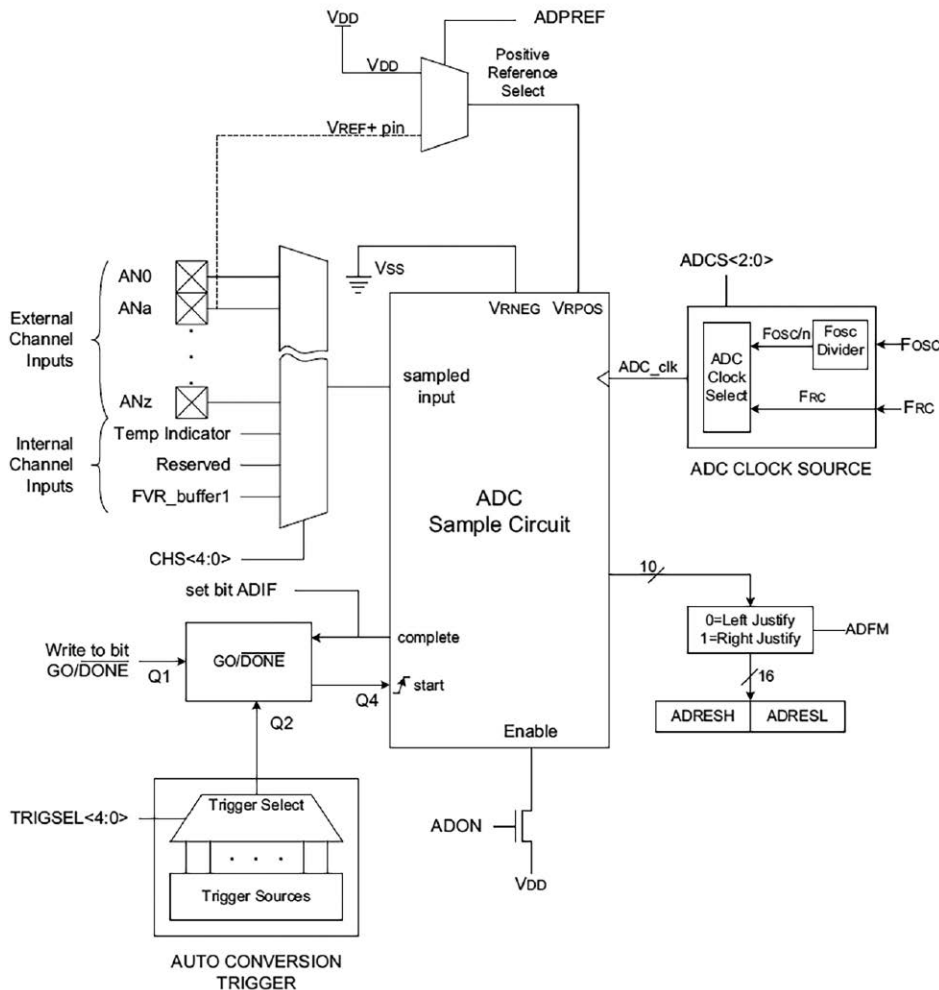
**Rysunek 12. Konfigurowanie modułu FVR (źródła napięcia odniesienia)**

Można wpisać 17 lub 18, ale w trakcie sekwencyjnej zmiany napięcia w każdym z kroków będziemy dodawać do poprzedniej wartości 17,85. Przy takim postępowaniu regulacja „nie rozjedzie się” po kilku krokach. Program wpisuje do przetwornika wartość zaokrągloną w dół, czyli dla 0,5 V wpisuje 17 i w teorii na wyjściu zasilacza będzie  $17 \times 0,028 = 0,476$  V, a dla 1 V  $(17,85 \times 2) \times 0,028 = 35,7 \times 0,028$ , czyli  $35 \times 0,028 = 0,98$  V. Gdyby była potrzebna większa dokładność, to trzeba by było zastosować przetwornik o większej rozdzielczości, na przykład 12-bitowy. Trzeba przy tym pamiętać o niepewnościach napięcia referencyjnego i samego przetwornika C/A.

Przetwornik 12-bitowy zastosowano w poprzedniej wersji zasilacza. Dlatego tam było możliwe ustawianie napięcia wyjściowego z rozdzielczością 0,1 V. Jednak ze względu na nieliniowości przetwornika i wewnętrznych wzmacniaczy operacyjnych musiałem zastosować programową korektę, aby napięcie było ustawiane z akceptowaną dokładnością. W praktyce różnica pomiędzy wyliczoną przez arytmetykę zmiennoprzecinkową wartością a wartością wynikającą z zaokrągleń i zastosowanej rozdzielczości 10-bitowej jest pomijalna dla urządzenia typu zasilacz warsztatowy. W zasilaczach z analogowymi miernikami wskazówkowymi napięcia wyjściowego precyzyjne ustawienie napięcia z rozdzielczością 0,5 V będzie o wiele trudniejsze, jeżeli w ogóle możliwe.

Na **listingu 3** pokazano pętlę główną ustawiania napięcia wyjściowego zasilacza. Po odczytaniu statusu procedury obsługi enkodera i wykryciu stanu obrócenia ośki napięcie jest zwiększane lub zmniejszane





**Rysunek 13. Schemat blokowy przetwornika A/C**

o 0,5 V. Zmienna *volt* typu *float* zawiera wartość modyfikowaną o 17,85 przy każdym obrocie enkodera. Potem ta wartość jest zapisywana do przetwornika poprzez jawne rzutowanie typu *unsigned int*. Następnie program czeka 80 ms na ustabilizowanie się napięcia, mierzy oraz wyświetla napięcie wyjściowe i prąd obciążenia zasilacza. Jeżeli ośka enkodera nie jest obracana, to pomiary napięcia i prądu są wykonywane automatycznie co 0,5 sekundy (wyzwalane za

pomocą funkcji *Frame\_ms(500)*). Ta funkcja wykorzystuje procedury obsługi przerwań od licznika wywoływane co 1 ms. Po odliczeniu 500 ms jest ustawiana flaga *ftime*, wykonywany pomiar napięcia i prądu, następnie flaga *ftime* jest zerowana i cykl się powtarza. Przyciśnięcie ośki powoduje wejście do procedury ustawiania progu zabezpieczenia prądowego.

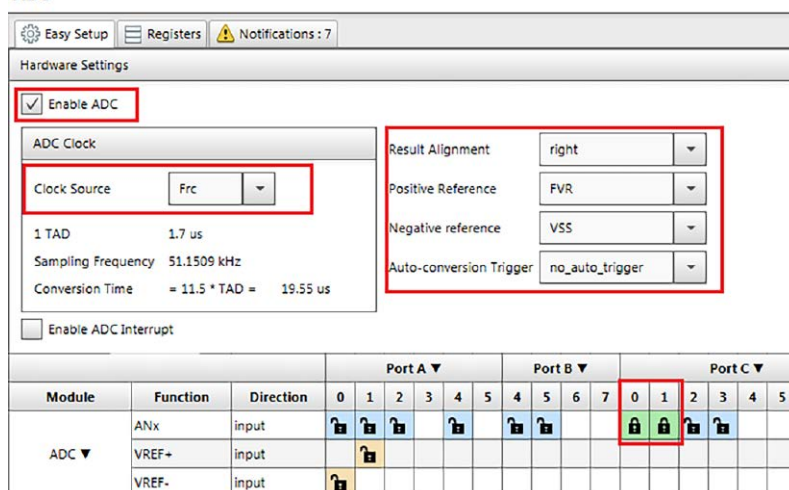
Pomiar napięcia i prądu jest wykonywany przez przetwornik A/C (rysunek 13).

W przetworniku zastosowano konwerter SAR. Prędkość konwersji (maksymalnie 100 kSa/s) jest dostosowana do wydajności 8-bitowego rdzenia. Próbkowane napięcie jest doprowadzane przez multiplekser do kondensatora wejściowego o małej pojemności. Po uruchomieniu konwersji jest ustawiany bit *GO* w rejestrze *ADCON* lub następuje zdarzenie wyzwalające automatycznie konwersję. Kondensator jest odłączany od wejścia i jest wykonywana konwersja analogowo-cyfrowa. Jej wynik jest zapisywany w 16-bitowym rejestrze *ADRES*. Źródłem taktowania przetwornika może być wewnętrzny oscylator RC (*Frc*) o stałej częstotliwości ok. 500 kHz. Taki tryb taktowania pozwala na pracę przetwornika w trybie ograniczonego poboru mocy (*sleep*), kiedy wszystkie przebiegi taktujące są wyłączone. Do taktowania można też użyć podzielonego przebiegu zegarowego rdzenia. Częstotliwość taktująca przetwornik nie była wyższa niż maksymalna częstotliwość taktowania przetwornika ( $T_{ad} \geq 1 \mu s$ ).

Przy napięciu wyjściowym +28 V na wyjściu dzielnika powinno panować napięcie +4 V, a identycznie jak na wyjściu układu pomiaru prądu przy natężeniu prądu obciążenia wynoszącym 3 A. Przy okazji omawiania modułu źródła napięcia referencyjnego *FVR* wspominałem, że bufor *FVR\_buf1* jest zaprogramowany na 4,096 V i jego napięcie będzie wykorzystywane jako napięcie referencyjne dla przetwornika analogowo-cyfrowego A/C.

Przetwornik A/C jest konfigurowany za pomocą MCC (rysunek 14). Odblokowujemy działanie przetwornika i wybieramy rodzaj taktowania z wewnętrznego oscylatora RC *Frc*. Jako napięcie referencyjne wybieramy *FVR* (wyjście *FVR\_buf1* zostanie przyłączone automatycznie). 10-bitowy wynik wyjściowy jest w formacie „dosunięty do prawej”. Po skonfigurowaniu przetwornika trzeba jeszcze skonfigurować dwa wejścia analogowe *AN4* (*RC0*)

#### ADC



**Rysunek 14. Konfiguracja przetwornika A/C**

REKLAMA

do pomiaru napięcia i AN5(RC1) do pomiaru prądu. Konfiguracja modułu ADC jest wykonywana przez pokazaną na **listingu 4** funkcję `void ADC_Initialize(void)`. Inicjowanie konwersji analogowo-cyfrowej i odczytywanie wyniku ze wskazanego wejścia analogowego realizuje funkcja `adc_result_t ADC_GetConversion(adc_channel_t channel)`. Jej argumentem jest numer analogowego wejścia przetwornika, a rezultatem 10-bitowy wynik umieszczony w 16-bitowej liczbie z dosunięciem do prawej strony (**listing 5**).

Wyświetlenie pomiaru napięcia w woltach wymaga obliczeń. Napięciu +28 V odpowiada +4 V po podzieleniu przez dzielnik. Czyli inaczej mówiąc, napięciu +28 V odpowiada wynik konwersji równy 1000 dla napięcia referencyjnego 4,096 V. Zmiana napięcia na najmłodszym bicie odpowiada zmianie napięcia wyjściowego o  $28\text{ V}/1000=0,028\text{ V}$ . Aby obliczyć wartość odczytaną z przetwornika na napięcie w woltach, trzeba ją pomnożyć przez 0,028. Procedura pomiaru napięcia rozpoczyna się od obliczenia średniej z kolejnych 10 pomiarów wykonywanych w odstępie co 2 ms. Potem średnia wartość odczytana z przetwornika jest mnożona przez 0,028, a właściwie mnożona przez 2,8 i dzielona przez 100 (**listing 6**).

Do sformatowania wyniku pomiaru użyłem funkcji `sprintf` z biblioteki `stdio.h`. Znaki są zapisywane do bufora. Wskaźnik do tego bufora jest argumentem funkcji. Jeżeli napięcie jest mniejsze niż 10 V, to jest wyświetlane w postaci dwóch cyfr: jedności i cyfry po przecinku. Dla napięcia powyżej 10 V wyświetlane są trzy cyfry: dziesiątki, jedności i cyfra po przecinku. Funkcję wyświetlającą napięcie pokazano na **listingu 7**. Jej argumenty to napięcie w formacie zmiennej przecinkowej oraz współrzędne początku wyświetlania na ekranie.

Analogicznie jest wykonywany pomiar natężenia prądu. Maksymalne napięcie, które występuje na wyjściu układu pomiarowego, powinno wynosić 4 V dla prądu o natężeniu 3 A. Większy prąd nie powinien płynąć, bo na taką wartość ustawiono domyślne, maksymalne zabezpieczenie prądowe. Funkcja pomiaru prądu rozpoczyna się od wykonania 10 pomiarów i obliczenia średniej. Potem następuje przeliczenie odczytanej wartości na ampery. Wartości 3 A odpowiadają 4 V, czyli liczba 1000 z przetwornika. Zmiana wartości na najmłodszym bicie odpowiada  $3\text{ A}/1000=0,003\text{ A}$ , więc aby obliczyć natężenie prądu, należy liczbę z przetwornika pomnożyć przez 0,003. W programie ta wartość jest mnożona przez 3 i dzielona przez 1000, jak na **listingu 8**.

Próg zabezpieczenia prądowego jest wykonywany przez funkcję `SetI(void)` – **listing 9**.

Po naciśnięciu ośki impulsatora na ekranie w linii wyświetlającej nastawiony próg zabezpieczenia jest wyświetlany komunikat „<-Set”. Kręcąc ośką, zmieniamy nastawiony próg z krokiem 0,1 A. Nastawiana wartość po przeliczeniu jest wysyłana do przetwornika DAC2 i wyświetlana przez procedurę `DispI()`. Po odliczeniu 80 ms program

mierzy i wyświetla napięcie na wyjściu oraz prąd pobierany z zasilacza. Pozwala to na bezpośrednią obserwację wpływu zmiany progu zabezpieczenia prądowego. Po naciśnięciu ośki funkcja kończy działanie i program przechodzi do pętli głównej, w której można ustawiać napięcie wyjściowe i jest wykonywany pomiar napięcia i prądu.

**Listing 4. Inicjalizacja modułu przetwornika A/C**

```
void ADC_Initialize(void)
{
    // set the ADC to the options selected in the User Interface
    // ADGO stop; ADON enabled; CHS AN4;
    ADCON0 = 0x11;
    // ADFM right; ADNREF VSS; ADPREF FVR; ADCS Frc;
    ADCON1 = 0xF3;
    // TRIGSEL no_auto_trigger;
    ADCON2 = 0x00;
    // ADRESL 0;
    ADRESL = 0x00;
    // ADRESH 0;
    ADRESH = 0x00;
}
```

**Listing 5. Konwersja analogowo-cyfrowa**

```
adc_result_t ADC_GetConversion(adc_channel_t channel)
{
    // wybór kanału pomiarowego
    ADCON0bits.CHS = channel;
    // włączenie modułu
    ADCON0bits.ADON = 1;
    // opóźnienie czasu akwizycji
    delay_us(ACQ_US_DELAY);
    // Start konwersji
    ADCON0bits.ADGO = 1;
    // czekanie na zakończenie konwersji
    while (ADCON0bits.ADGO)
    {
    }
    // zwracanie wyniku pomiaru
    return ((ADRESH << 8) + ADRESL);
}
```

**Listing 6. Pomiar napięcia i przeliczenie na napięcie w woltach**

```
void DispNap(unsigned char x, unsigned char y)
{
    unsigned char i;
    double vol;
    vol=0;
    for(i=0;i<10;i++) //wykonanie kolejnych 10 pomiarów
    {
        vol=vol+ADC_GetConversion(4); //konwersja w kanale analogowym AN_4
        Delay_ms(2);
    }
    vol=vol/10; //średnia z 10 pomiarów
    vol=vol*2.8; //przeliczenie wartości odczytanej z ADC na wolt
    vol=vol/100;
    DispVolt(vol,x,y); //wyświetlenie pomiaru w woltach
    volp=vol;
}
```

**Listing 7. Wyświetlenie napięcia na wyświetlaczu**

```
void DispVolt(double vol,unsigned char x, unsigned char y)
{
    char buf[10];
    if(vol<10) //dla napięcia poniżej 10V
        sprintf(buf,"%1.1fV ",vol);
    else sprintf(buf,"%2.1fV ",vol);
    PosLcd(x,y);
    DispLcdRam(buf);
}
```

**Listing 8. Pomiar prądu zasilacza**

```
void DispPr(unsigned char x, unsigned char y)
{
    unsigned char i;
    double pr;
    pr=0;
    for(i=0;i<10;i++)
    {
        pr=pr+ADC_GetConversion(5);
        Delay_ms(2);
    }
    pr=pr/10;
    pr=pr*3;
    pr=pr/1000;
    DispI(pr,x,y);
}

void DispI(double pr,unsigned char x, unsigned char y)
{
    char buf[10];
    if(pr<1)
        sprintf(buf,"%1.2fA ",pr);
    else
        sprintf(buf,"%2.1fA ",pr);
    PosLcd(x,y);
    DispLcdRam(buf);
}
```

**Listing 9. Ustawianie progu zabezpieczenia prądowego**

```
void SetI(void)
{
    unsigned char kod;
    PosLcd(15,4);DispLcd(„-Set”);
    DispIoGr(PL,4);
    while(1)
    {
        kod=GetEncoder();
        if(kod==KOD_IMP_UP)
        {
            iogr=ioGr+30.8;
            if(iogr>925)
                iogr=925;
            DAC2_Load10bitInputData((unsigned int)iogr);
            Delay_ms(80);
            DispIoGr(PL,4);
            Delay_ms(80);
            DispNap(PLV,1);
            DispPr(PL,3);
        }
        if(kod==KOD_IMP_DWN)
        {
            iogr=iogr-30.8;
            if(iogr<30.8)
                iogr=30.8;
            DAC2_Load10bitInputData((unsigned int)iogr);
            Delay_ms(80);
            DispIoGr(PL,4);
            Delay_ms(80);
            DispNap(PLV,1);
            DispPr(PL,3);
        }
        if(kod==KOD_IMP_ST)
        {
            Delay_ms(200);
            PosLcd(15,4);DispLcd(„      ”);
            DispIoGr(PL,4);
            return;
        }
    }
}
```

**Listing 10. Procedura odczytania słowa z pamięci Flash**

```
uint16_t FLASH_ReadWord(uint16_t flashAddr)
{
    uint8_t GIEBitValue = INTCONbits.GIE;    // zapisanie stanu bitu GIE

    INTCONbits.GIE = 0;    // Zablokowanie przerwań
    PMADRL = (flashAddr & 0x00FF);
    PMADRH = ((flashAddr & 0xFF00) >> 8);
    PMCON1bits.CFGS = 0;    //
    PMCON1bits.RD = 1;    // zainicjowanie odczytu danych
    NOP();
    NOP();
    INTCONbits.GIE = GIEBitValue;    // Odtworzenie stanu bitu GIE
    return ((PMDATH << 8) | PMDATL);
}
```

**Listing 11. Procedura zapisu wiersza do pamięci Flash**

```
int8_t FLASH_WriteBlock(uint16_t writeAddr, uint16_t *flashWordArray)
{
    uint16_t blockStartAddr=(uint16_t)(writeAddr&((END_FLASH-1)^(ERASE_FLASH_BLOCK-
SIZE-1)));
    uint8_t GIEBitValue=INTCONbits.GIE;    // Save interrupt enable
    uint8_t i;

    // zapis Flash musi się rozpoczynać od początku wiersza
    if( writeAddr != blockStartAddr ) return -1;
    // Zapisanie stanu zezwolenia na przerwanie
    INTCONbits.GIE = 0;
    // sekwencja kasowania wiersza
    FLASH_EraseBlock(writeAddr);
    // sekwencja zapisu wiersza
    PMCON1bits.CFGS = 0;    // Deselect Configuration space
    PMCON1bits.WREN = 1;    // Enable writes
    PMCON1bits.LWLO = 1;    // Only load write latches
    for( i=0; i<WRITE_FLASH_BLOCKSIZE; i++)
    {
        // 8 młodszych bitów adresu
        PMADRL = (writeAddr & 0xFF);
        // 6 starszych bitów adresu
        PMADRH = ((writeAddr & 0xFF00) >> 8);
        // zapisanie danych
        PMDATL = flashWordArray[i];
        PMDATH = ((flashWordArray[i] & 0xFF00) >> 8);
        if( i == (WRITE_FLASH_BLOCKSIZE-1) )
        {
            // start zapisu pamięci Flash
            PMCON1bits.LWLO = 0;
        }
        PMCON2 = 0x55;
        PMCON2 = 0xAA;
        PMCON1bits.WR = 1;
        NOP();
        NOP();
        writeAddr++;
    }
    // zablokowanie zapisu
    PMCON1bits.WREN = 0;
    // odtworzenie stanu zezwolenia na przerwanie
    INTCONbits.GIE = GIEBitValue;
    return 0;
}
```

Zmiana każdej nastawy jest zapamiętywana w nieulotnej pamięci Flash mikrokontrolera. Po każdym włączeniu zawartość zapisanych wartości jest odczytywana z pamięci Flash i zasilacz jest ustawiony tak jak przed wyłączeniem. Uwalnia nas to od każdorazowego ustawiania na nowo napięcia wyjściowego i zabezpieczenia prądowego po włączeniu zasilania.

Do zapamiętywania danych użytkownika w pamięci nieulotnej w rodzinach PIC16F Microchip stosował odrębną pamięć EEPROM. W rodzinie PIC16F1xxx zrezygnowano zapewne z powodu kosztów produkcji z pamięci EEPROM, ale w zamian dodano możliwość zapisu danych użytkownika w pamięci programu Flash. Na końcu przestrzeni pamięci programu wydzielono przestrzeń mieszczącą 128 słów, spełniającą funkcję pamięci EEPROM. Tych 128 słów ma podwyższoną liczbę cykli kasowanie/zapis. Kasowanie i zapisywanie danych odbywa się w porcjach (wierszach) mających 32 słowa 14-bitowe. Nie można zapisać jednego słowa – zapisują się od razu 32 słowa całego wiersza. Dlatego w praktyce dane przeznaczone do zapisywania w tej nieulotnej pamięci są przechowywane w buforze RAM mieszczącym 32 słowa 16-bitowe. Również adresowanie podlega pewnym ograniczeniom. Adres początkowy wiersza musi być wielokrotnością liczby 32. Jeżeli tak nie jest, to układy kontrolne zablokują zapis danych. Podobnie jak w pamięci EEPROM, musi być wykonana sekwencja kontrolna polegająca na zapisaniu danych do rejestrów w określonej sekwencji.

Gotowe funkcje zapisu i odczytu są generowane przez wtyczkę MCC. Na **listingu 10** pokazano funkcję odczytującą dane z pamięci Flash. Adres komórki jest argumentem procedury, a odczytana wartość jest zwracana w formie liczby 14-bitowej umieszczonej w rejestrze 16-bitowym. Funkcję zapisującą dane pokazano na **listingu 11**. Pierwszy argument to adres, który musi być początkiem wiersza, a drugi jest wskaźnikiem na bufor z 32 słowami zapisywanymi w jednym cyklu zapisu.

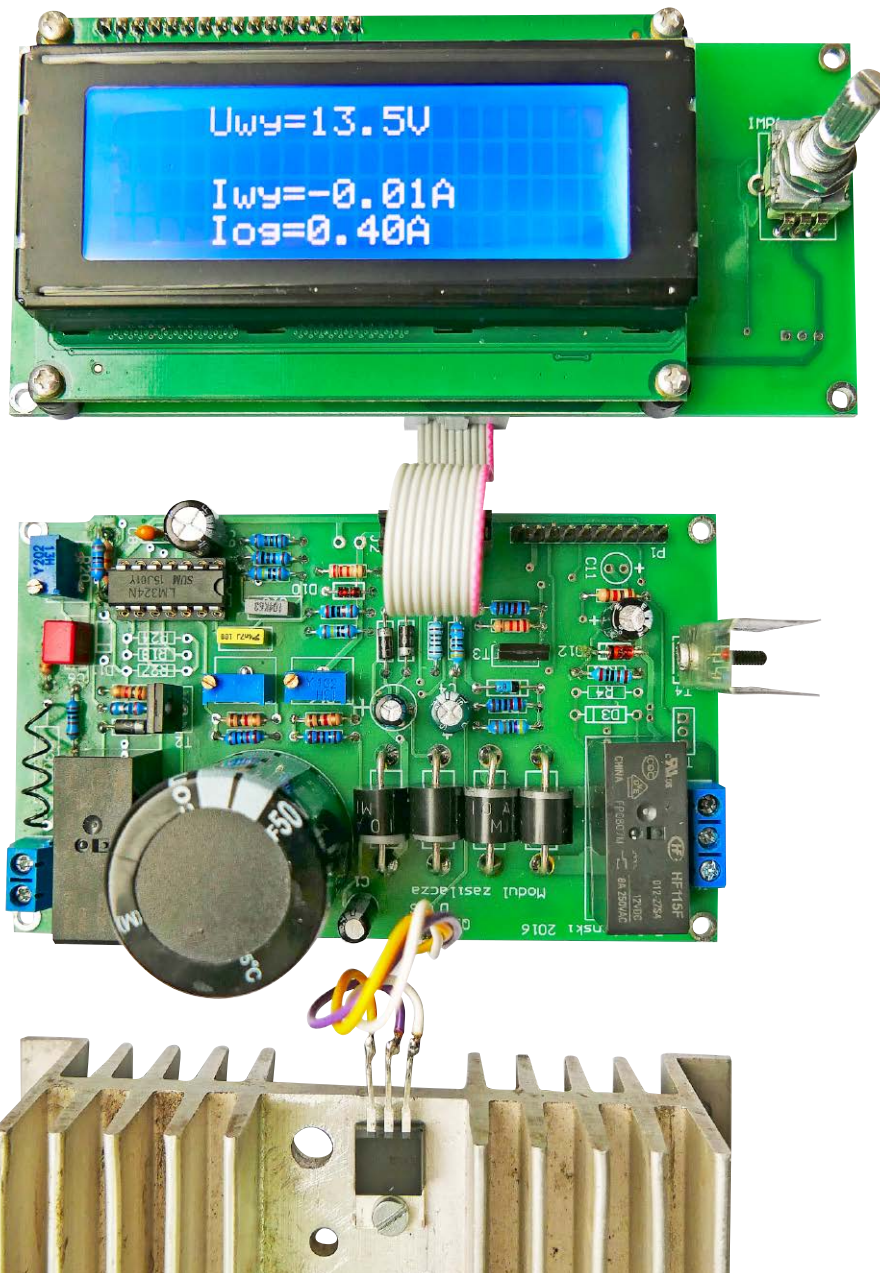
**Tomasz Jabłoński, EP**

REKLAMA



# Zasilacz warsztatowy (3)

Kilka lat temu opisywałem na łamach *Elektroniki Praktycznej* projekt zasilacza sterowanego cyfrowo. Tamten zasilacz pracuje bezawaryjnie do dzisiaj, jednak postanowiłem zaprojektować i zbudować kolejny, o nieco lepszych parametrach elektrycznych nieco prostszy w konstrukcji. W pierwszej części artykułu omówiłem jego budowę, w drugiej oprogramowanie. Kończąc opiszę sposób montażu i uruchomienia zasilacza.



## DODATKOWE MATERIAŁY NA FTP:

<ftp://ep.com.pl>

USER: 33372, PASS: 6nwd5fk4

W ofercie AVT\*

AVT-5579

### Podstawowe informacje:

- Napięcie wyjściowe regulowane w zakresie 0...28 V DC.
- Prąd wyjściowy regulowany w zakresie 0...3 A.
- Stabilizator liniowy, analogowy z szeregowym tranzystorem regulacyjnym.
- Pomiar prądu i napięcia wyjściowego.
- Sterowanie zasilaczem za pomocą mikrokontrolera.

### Projekty pokrewne na FTP:

(wymienione artykuły są w całości dostępne na FTP)

|          |                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| AVT-1946 | Zasilacz napięcia symetrycznego z LM27762 (EP 2/2017)                               |
| AVT-1938 | Moduł zasilacza z układem KDSN05 (EP 11/2016)                                       |
| AVT-1895 | Uniwersalny moduł zasilający (EP 10/2016)                                           |
| AVT-1913 | Moduł miniaturowego zasilacza (EP 8/2016)                                           |
| AVT-5546 | Stabilizator z kompensacją spadku napięcia na przewodach połączeniowych (EP 7/2016) |
| AVT-1882 | Regulowany zasilacz napięcia symetrycznego (EP 9/2015)                              |
| AVT-1865 | Dołączany do USB zasilacz napięcia symetrycznego z układem ADP5071 (EP 8/2015)      |

\* Uwaga! Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu.

Wymagana umiejętność lutowania!

Podstawową wersją zestawu jest wersja [B] nazywana potocznie Kitem (z ang. zestaw). Zestaw w wersji [B] zawiera elementy elektroniczne (w tym [UK] – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wylutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu.

Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:

- wersja [C] zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw [B] (elementy wylutowane w płytkę PCB)
- wersja [A] płytkę drukowaną bez elementów i dokumentacja

Kity w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, posiadają następujące dodatkowe wersje:

- wersja [A+] płytkę drukowaną [A] + zaprogramowany układ [UK] i dokumentacja
- wersja [UK] zaprogramowany układ

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik pdf! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz! <http://sklep.avt.pl>

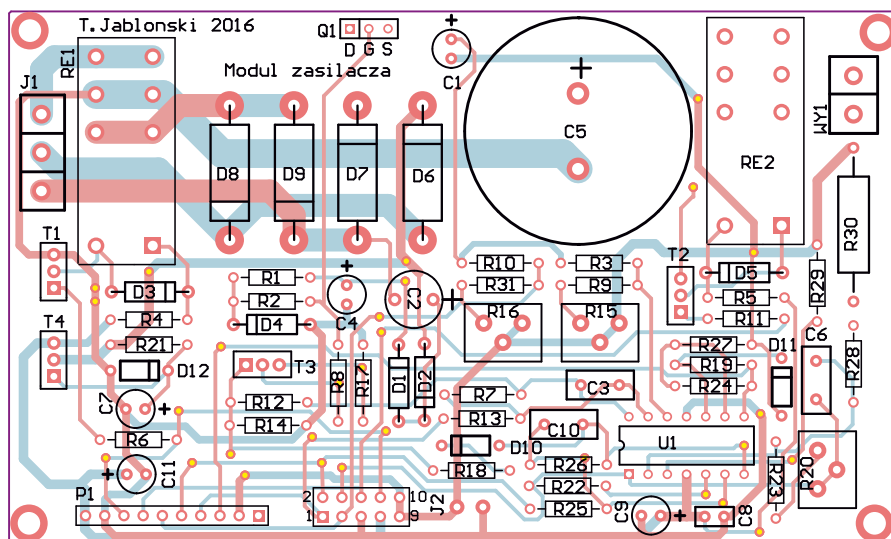
Zasilacz składa się z dwóch płytek – analogowej i cyfrowej. Ich uruchomieniem zajmujemy się kolejno, zaczynając od części analogowej.

## Płytkę analogową

Schemat montażowy płytki analogowej pokazano na **rysunku 15**. W prototypie przewidziano zamontowanie dwóch przełączników – RE1 i RE2. Przełącznik RE1 ma za zadanie przełączanie odczepu na uzwojeniu wtórnym transformatora, aby przy niskim napięciu wyjściowym ograniczyć straty mocy na tranzystorze regulującym. W obecnej wersji zasilacza ta funkcjonalność nie jest wykorzystywana i zamiast RE1 trzeba wylutować dwie zwory wykonane ze srebrzanki

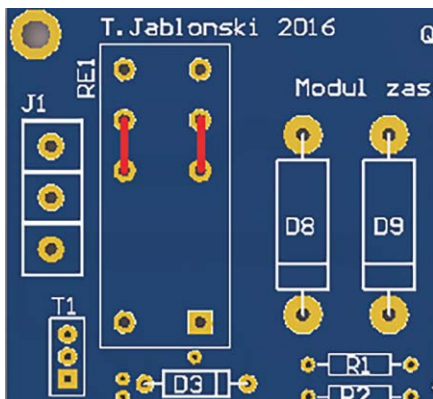
o przekroju przynajmniej 1 mm<sup>2</sup>, jak pokazano na **rysunku 16**. Nie montujemy też tranzystora T1, rezystorów R6 i R4 oraz diody D3. Dla układu wzmacniacza LM324 można zamontować podstawkę precyzyjną. Po zmontowaniu płytki trzeba zwrócić uwagę na prawidłową polaryzację diod prostowniczych i kondensatorów, szczególnie C5. Do złącza J1 dołączamy uzwojenie wtórne transformatora o napięciu wtórnym 30...32 V AC i mocy ok. 100 VA (lub większej), jak na **rysunku 17**.

Pierwsze włączenie można wykonać bez zamontowanego LM324. Sprawdzamy poprawność napięcia na kondensatorze C5 (40...45 V bez obciążenia), napięcie wyjściowe +15 V

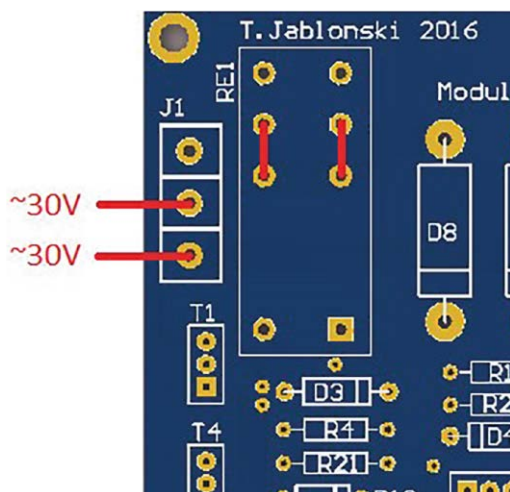


**Rysunek 15. Schemat montażowy płytki analogowej**

z układu zasilania wzmacniacza operacyjnego i sterownika oraz napięcie +40 V stabilizowane diodą D4 z układu polaryzacji bramki tranzystora szeregowego Q1. Po tych czynnościach można dołączyć tranzystor Q1 oraz włożyć w podstawkę lub wlutować wzmacniacz operacyjny LM324 (U1).



**Rysunek 16. Sposób montażu zwory zamiast przełącznika RE1 (kolor czerwony)**



**Rysunek 17. Sposób dołączenia transformatora**

Do uruchomienia i regulacji modułu analogowego będzie potrzebny miernik uniwersalny. Przydatny będzie też oscyloskop, żeby ocenić poziom zakłóceń na wyjściu oraz stwierdzić brak wzbudzenia się wzmacniacza błędów i komparatora w układzie ograniczenia prądowego. Zasilacz zmontowany ze sprawnych elementów nie powinien się wzbudzać i oscyloskop nie jest bezwzględnie potrzebny. Do uruchomienia będzie też potrzebne regulowane źródło napięcia z zakresu 0...4 V lub w ostateczności tylko +4 V. Do wstępnego uruchomienia nie powinno się używać sterownika mikroprocesorowego, bo na wyjściu niewyregulowanego układu pomiaru prądu lub napięcia może wystąpić zbyt wysokie napięcie, które uszkodzi mikrokontroler.

**REGULACJA NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO** Regulacja napięcia wyjściowego polega na ustawieniu napięcia wyjściowego +28 V dla  $U_{reg}=4$  V. Do pinu 2 złącza P1 dołączamy ujemny biegun (masę), a do pinu 4 dodatni biegun zewnętrznego napięcia o dokładnie ustawionej wartości +4 V (rysunek 18). Teraz potencjometrem R15 ustawiamy na wyjściu zasilacza napięcie +28 V. Od tej regulacji zależy dokładność ustawiania napięcia wyjściowego przez sterownik mikroprocesorowy. Jeżeli mamy dokładnie ustawione napięcie +28 V, to za pomocą potencjometru R16 ustawiamy napięcie  $U_{wy}$  na dokładną wartość +4 V. Napięcie  $U_{wy}$  mierzymy na pinie 6 złącza P1. Od dokładności tej regulacji będzie zależała dokładność pomiaru napięcia wyjściowego przez sterownik mikroprocesorowy.

Obie opisane regulacje należy przeprowadzić starannie i ewentualnie po pewnym czasie pracy zasilacza skorygować. Potencjometry R15 i R16 powinny być dobrej jakości i z wiarygodnego źródła.

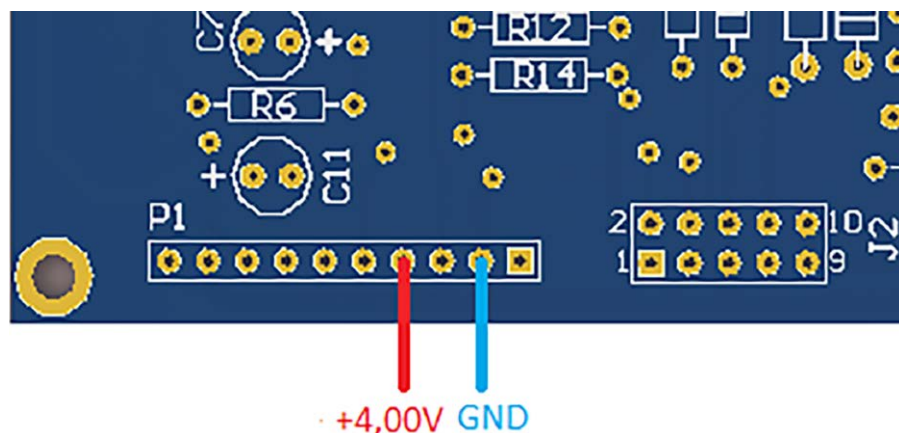
**REGULACJA UKŁADU POMIARU PRĄDU** Do dokładności pomiaru prądu w zasilaczu nie jest

bardzo krytyczna. Zazwyczaj zależy nam by znać rząd natężenia prądu pobieranego przez zasilany układ, a nie jego dokładną wartość co do miliampera. Metoda techniczna pozwala na dokładny pomiar, jednak przepływ prądu przez rezystor pomiarowy powoduje jego rozgrzewanie się i w konsekwencji – wzrost rezystancji. Można temu zapobiec stosując rezystory o dużej mocy i ograniczając czas pomiaru. W zasilaczu pomiar musi być wykonywany ciągle, ale można zastosować rezystor o dużej mocy. Moc wydzielaną na rezystorze pomiarowym dla najbardziej niekorzystnego przypadku przepływu 3 A można wyliczyć z równania  $P=I^2 \times R=3 \times 3 \times 0,1=0,9$  W. Zastosowanie rezystora o mocy 5 W jest rozsądnym kompromisem. W prototypie przy przepływie prądu 3 A rezystor robił się zauważalnie ciepły i po pewnym czasie wskazania były lekko zawyżane.

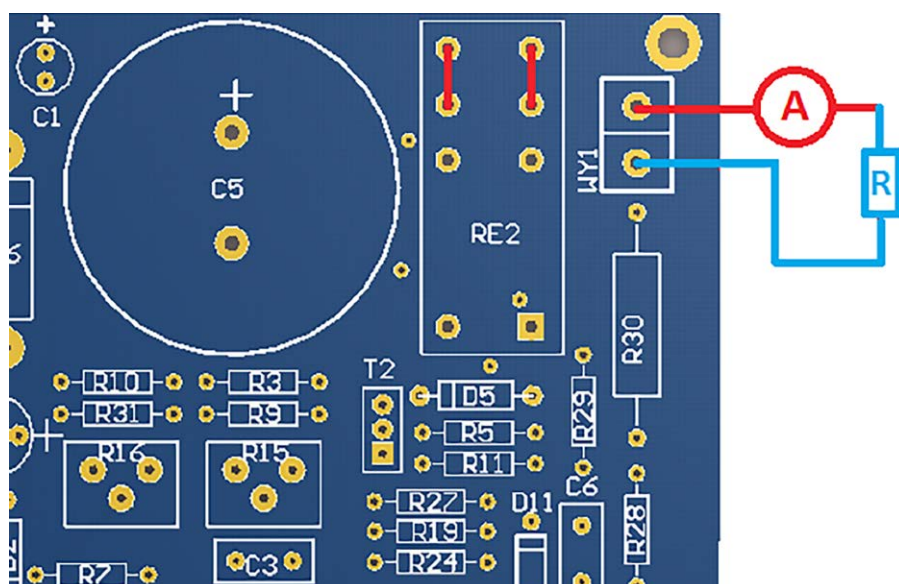
Do wyregulowania układu pomiaru prądu potrzebne będzie regulowane obciążenie, ewentualnie stałe obciążenie tak dobrane, żeby przy napięciu na przykład 20 V zasilacz dostarczał prąd o natężeniu 3 A. Ja użyłem regulowanej opornicy o dużej mocy, bardzo przydatnej przy uruchamianiu i testowaniu zasilacza. Opornica została wyprodukowana w Polsce w latach 70-tych i do dzisiaj pracuje niezawodnie. Obciążenie trzeba połączyć szeregowo z amperomierzem o zakresie 10 A do zacisków złącza WY1. Napięcie wyjściowe z zasilacza jest podawane na to złącze poprzez zwarte styki przełącznika RE2. Bez sterownika przełącznik jest w stanie spoczynkowym i trzeba od strony druku zewrzeć jego styki (rysunek 19). Po wymuszeniu na wyjściu prądu 3 A zmierzonego włączonym w szereg z obciążeniem amperomierzem, rezystorem R20 ustawiamy dokładne napięcie +4 V na nóżce 1 układu U1 (LM324). Kontrolnie można zmierzyć napięcie na rezystorze R30 – powinno ono wynosić ok. 300 mV. Przy regulacji prądu wygodnie jest mieć zmontowany układ do regulacji

REKLAMA





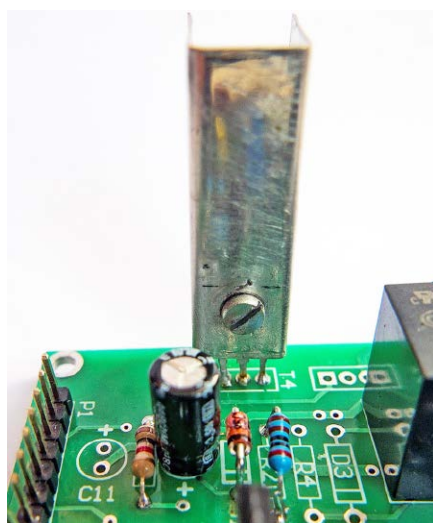
Rysunek 18. Sposób doprowadzenia napięcia Ureg



Rysunek 19. Układ do regulacji pomiaru prądu

napięcia (rysunek 17) i ewentualnie ustawić takie napięcie na wyjściu, żeby przy zastosowanym obciążeniu móc wymusić prąd 3 A. W prototypie było to +20 V.

Po wyregulowaniu układu pomiaru prądu trzeba usunąć zwory ze styków przekaźnika RE2. Przed połączeniem ze sterownikiem trzeba zamontować radiator na tranzystorze T4 pracującym w układzie

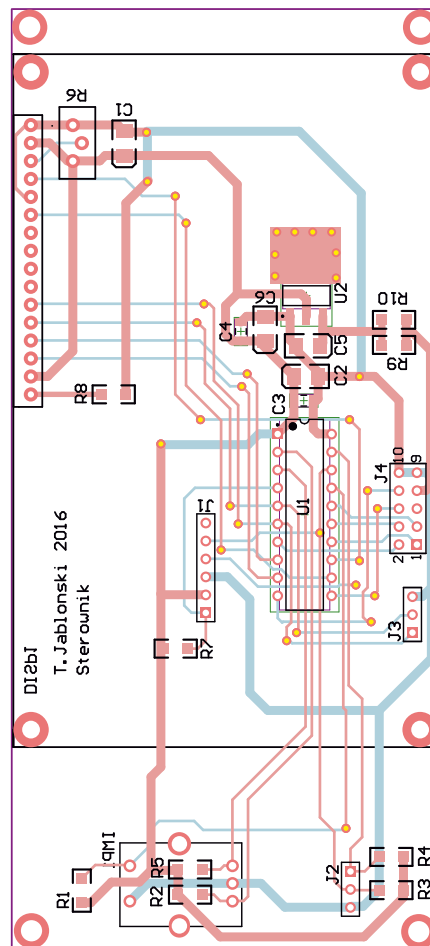


Fotografia 20. Radiator tranzystora T4

stabilizatora napięcia +15 V. Sterownik pobiera prąd ok. 80 mA (głównie do podświetlania wyświetlacza LCD). Moc traconą na tranzystorze szeregowym można oszacować jako  $P = (U_{we} - 15 \text{ V}) \times 0,08 \text{ A} = (42 - 15) \times 0,08 = 2,16 \text{ W}$ . Według danych katalogowych tranzystor BD139 pracuje w obszarze bezpiecznym przy ciągłym prądzie kolektora 0,08 A i spadku  $U_{ce} = 27 \text{ V}$ , ale wymaga solidnego radiatora. Brak radiatora powoduje natychmiastowe nagrzewanie się struktury i obudowy, co skutkuje zmniejszaniem się dopuszczalnej mocy traconej i w konsekwencji zniszczenia tranzystora. Na przykład, dla temperatury ok 60°C moc tracona musi być zredukowana do 70%. Na fotografii 20 pokazano radiator zastosowany w prototypie. Tranzystor z tym radiatorem pracował w zasilaczu po kilka godzin dziennie bez przerwy i nie uległ uszkodzeniu.

### Płytką sterownika

Płytką sterownika jest jednocześnie elementem konstrukcyjnym do zamocowania wyświetlacza LCD i impulsatora – jej schemat montażowy pokazano na rysunku 21. Montaż płytki rozpoczynamy od wlutowania wszystkich elementów



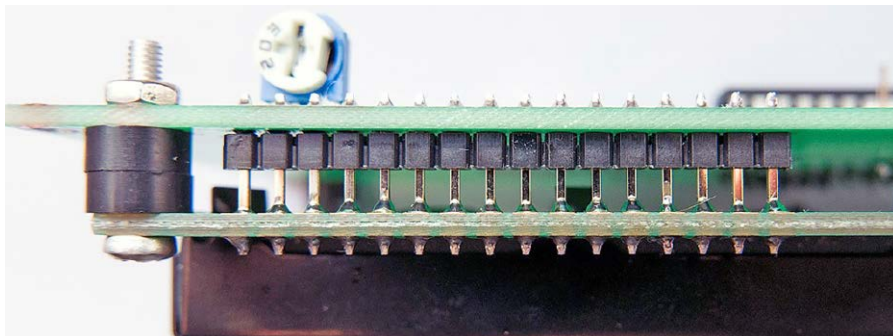
Rysunek 21. Schemat montażowy płytki sterownika

SMD, potencjometru do regulacji kontrastu, podstawki pod mikrokontroler oraz listew goldpinów na umownej stronie elementów (component layer). Po montażu trzeba szczególnie dokładnie sprawdzić luty w elementach przewlekanych (goldpiny, potencjometr i podstawka), bo po zamontowaniu wyświetlacza będzie je bardzo trudno poprawić.

Uruchomienie rozpoczynamy od podłączenia zasilania do pinów 9 (masa) i 7 (12 V). W tym momencie mikrokontroler powinien być wyjęty z podstawki. Po sprawdzeniu poprawności napięcia +5 V ze stabilizatora U2 można zamontować wyświetlacz i impulsator.

Wyświetlacz LCD i impulsator są montowane na umownej stronie lutowania (solder layer). Wyświetlacz jest połączony z płytką poprzez popularną listwę goldpinów o rastrze 2,54 mm (16 pinów). Trzeba najpierw włożyć listwę do otworów złącza DISP, a potem założyć wyświetlacz i przykręcić go czterema wkrętami M2,5 z tulejkami dystansowymi. Po przykręceniu można przylutować goldpiny do płytki sterownika i do płytki wyświetlacza (fotografia 22). Taka konstrukcja jest stabilna, łatwa w późniejszym montażu mechanicznym w obudowie. Połączenie na stałe, z krótkimi ścieżkami gwarantuje stabilną pracę wyświetlacza bez tendencji do zawieszania się





**Fotografia 22. Montaż i podłączenia wyświetlacza LCD**

przy zakłóceniach EMI, co może się zdarzać przy połączeniu kablami. Po zamontowaniu wyświetlacza z tej samej strony płytki wlotujemy impulsator.

Teraz można włożyć mikrokontroler w podstawkę i jeżeli nie był wcześniej zaprogramowany, to zaprogramować go w układzie. Do programowania jest przeznaczone złącze J1 ze stykami zgodnymi z wyprowadzeniami programatora PICkit3. Po prawidłowym zaprogramowaniu mikrokontrolera powinien pojawić się ekran główny, a na nim wskazanie napięcia, prądu i progu zabezpieczenia prądowego ustawionego domyślnie na 1 A. Jeżeli na ekranie nic się nie wyświetla, to trzeba wyregulować kontrast wyświetlacza potencjometrem R6.

Moduł sterownika można wstępnie uruchomić sprawdzając działanie ustawiania napięcia wyjściowego i poziomu zabezpieczenia prądowego za pomocą przetworników C/A. Do wyprowadzenia „10” złącza J4 dołączamy ujemny zacisk woltomierza, a do wyprowadzenia „1” zacisk dodatni. Kręcąc ośką impulsatora powinniśmy uzyskać zmianę napięcia w zakresie 0...+4 V. Moduł nie jest połączony z płytką analogową, więc na razie nie można obserwować wyniku regulacji. Następnie przyłączamy dodatni zacisk woltomierza do wyprowadzenia „2” złącza J4. Wciskamy ośkę impulsatora i wchodzimy do funkcji ustawiania progu zabezpieczenia prądowego. Na ekranie obok nastaw progu powinien być wyświetlony napis „<-set”. Kręcimy ośką i mierzymy zmianę napięcia.

Jeżeli wszystko jest w porządku, to można połączyć obie płytki za pomocą płaskiego kabla z zaciśniętymi dwoma wtyczkami IDC10. Trzeba przy tym pamiętać o prawidłowej orientacji kabla względem obu złącz: na płycie analogowej i na płycie sterownika.

Do pełnego końcowego uruchomienia będzie potrzebny komplet komponentów: transformator sieciowy, płytka analogowa z radiatorem o odpowiedniej powierzchni dla tranzystora szeregowego Q1 oraz płytka sterownika. Oprócz tego będziemy potrzebowali dwóch mierników: woltomierza i amperomierza oraz obciążenia rezystancyjnego o mocy ok 80...100 W i rezystancji minimum 5...7  $\Omega$ . Dla napięcia

wyjściowego 21 V i obciążenia 7  $\Omega$  przepłynie przez nie prąd 3 A, a wydzielana moc wyniesie 63 W. Można też testować zasilacz z mniejszymi obciążeniami.

Po włączeniu całości najpierw sprawdzamy poprawność ustawiania napięcia wyjściowego zasilacza. Jeżeli w czasie uruchamiania modułu analogowego regulacje były wykonane dokładnie, to nie trzeba będzie wykonywać ich ponownie. Może się jednak okazać, że trzeba będzie wykonać drobną korektę. Napięcia regulacyjne w sterowniku mogą się różnić od idealnych, na przykład – z powodu tolerancji źródła napięcia odniesienia FVR. Po dołączeniu miernika do zacisków wyjściowych zasilacza ustawiamy na sterowniku napięcie +28 V. Ewentualne różnice napięcia na wyjściu zasilacza mierzone multimetrem większe niż 100 mV korygujemy rezystorem R15. Różnice wskazań pomiaru większe niż 100 mV napięcia w sterowniku korygujemy rezystorem R16. Sprawdzanie można powtórzyć w kilku innych punktach, na przykład w połowie zakresu (14 V) i dla napięcia np. +5 V. Potem trzeba ustawić napięcie 20 V, dołączyć obciążenie szeregowo z amperomierzem i sprawdzić dokładność pomiaru prądu i ewentualnie skorygować wskazania rezystorem R20.

Najtrudniej będzie sprawdzić zadziałanie progu ograniczenia prądowego. Można to zrobić zwiększając napięcie wyjściowe przy stałym obciążeniu, lub przy stałym napięciu wyjściowym zmieniać obciążenie. Jak już wspomniałem, użyłem regulowanej opornicy o dużej mocy pozwalającej na płynną zmianę pobieranego prądu. Prawidłowo działające ograniczenie prądowe nie pozwala na pobór prądu większy niż nastawiony próg. Jeżeli obciążenie chce wymusić większy prąd, to zasilacz zaczyna ograniczać napięcie wyjściowe, aby ograniczyć pobór prądu. Końcowy efekt jest taki, że prąd wyjściowy ma wartość progu ograniczenia, a napięcie wyjściowe jest niższe niż nastawione.

## Obsługa zasilacza

Zgodnie z założeniami obsługa zasilacza powinna być tak łatwa, jak to tylko możliwe. Dlatego zrezygnowałem z menu

funkcyjnego. Do dyspozycji mamy możliwość ustawiania napięcia wyjściowego z krokiem 0,5 V oraz ustawiania progu zabezpieczenia prądowego z krokiem 0,1 A. Po pierwszym włączeniu po zaprogramowaniu pamięci sterownik ustawia domyślnie napięcie wyjściowe +5 V i ograniczenie prądowe 1 A. Regulacja napięcia odbywa się poprzez kręcenie ośką impulsatora. Po wciśnięciu ośki jest wywoływana funkcja ustawiania progu zabezpieczenia prądowego. Po powtórным przyciśnięciu ośki program przechodzi powtórnie do funkcji ustawiania napięcia wyjściowego.

## Na koniec

Można sobie zadać pytanie czy warto projektować i budować przyrządy, takie jak zasilacze warsztatowe, skoro można kupić gotowe w cenie niewiele wyższej od ceny materiałów potrzebnych do wykonania opisywanego urządzenia? Według mnie warto. Po pierwsze, koszty można ograniczyć stosując elementy zalegające w szufladzie. Dotyczy to szczególnie transformatora sieciowego, elementów biernych i obudowy. Zastosowanie taniego mikrokontrolera z rozbudowanymi peryferiami pozwoliło na znaczące uproszczenie budowy sterownika. Układ analogowy zbudowano w oparciu o powszechnie dostępne i tanie elementy.

Budowanie zasilacza ma też walory edukacyjne, trudne do przecenienia. Zastosowane tu rozwiązania są przykładem połączenia techniki analogowej z układami wzmacniaczy błędów i wzmacniaczy napięcia stałego z cyfrowym sterownikiem. Przy projektowaniu, uruchamianiu i regulacji trzeba poznać, i zastosować układy analogowe, a wiedza o nich w czasach powszechnej, cyfrowej obróbki sygnałów nie jest już tak powszechna. Trzeba też poznać i zastosować techniki pomiaru napięcia i prądu oraz określić i uwzględnić błędy pomiarów. I na koniec pozostaje satysfakcja z samodzielnie zbudowanego elementu domowego laboratorium.

**Tomasz Jabłoński, EP**

REKLAMA