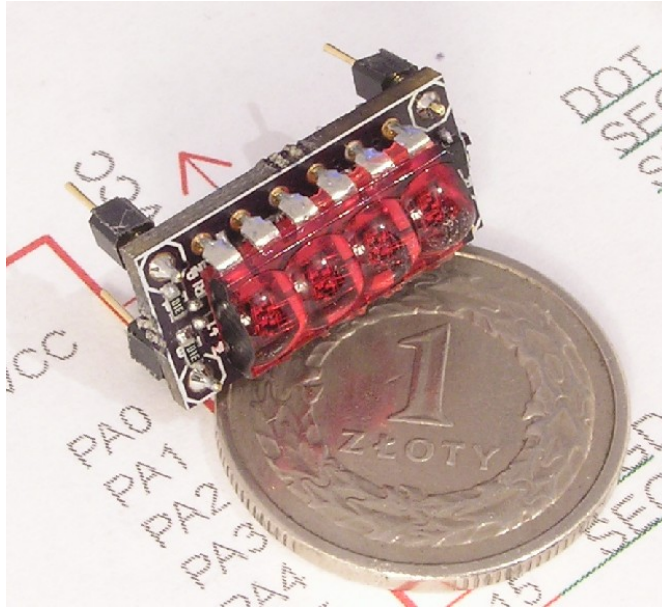


Miniwoltomierz

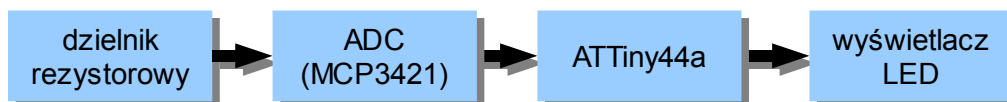
SQ3NQJ



Układ służy do pomiaru napięcia, wykorzystuje niewielką liczbę komponentów i cechuje się niezwykle małymi rozmiarami. Zmierzoną wartość napięcia wyświetla za pomocą miniaturowych siedmiosegmentowych wyświetlaczy LED. Stopień podziału w dzielniku wejściowym jest zaprojektowany tak, aby prezentowany woltomierz można było wykorzystać do pomiaru napięć stałych w zakresie od $-200V$ do $+200V$. Pomimo tego, ze względu na budowę urządzenia i bezpieczeństwo jego użytkowania zakres bezpiecznie mierzonych napięć jest mniejszy i ograniczony względami bezpieczeństwa użytkownika. Różnicowa impedancja wejściowa wynosi około $2M\Omega$.

Układ wykonany jest w technologii montażu powierzchniowego, wykorzystuje jedynie dwa układy scalone: mikrokontroler oraz przetwornik analogowo-cyfrowy. Pozostałe elementy to 1 tranzystor, dioda Zenera i rezystory oraz kondensatory.

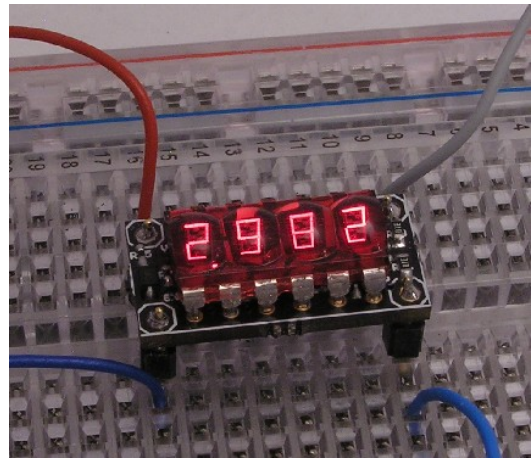
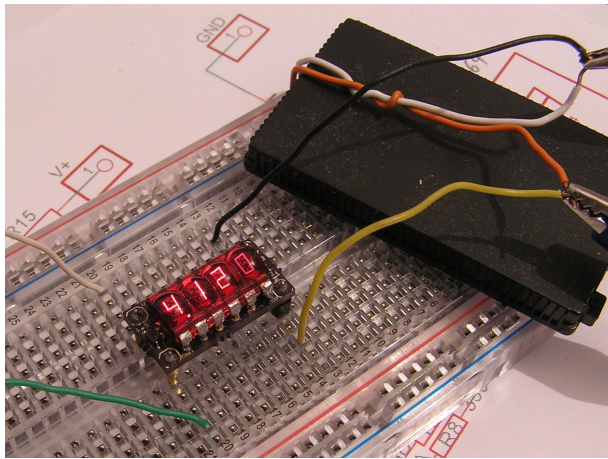
Schemat blokowy układu przedstawiony jest na rysunku 1, a dokładny schemat ideowy przedstawiony jest na rysunku 3 na końcu dokumentu. Spis elementów zamieszczony jest w tabeli 1 na końcu dokumentu.



Rysunek 1. Schemat blokowy woltomierza.

Zastosowanie niewielkich elementów i ograniczenie ich liczby umożliwiło spektakularne zmniejszenie całości urządzenia do wymiarów **20,5mm** na **10,5mm** i wysokość, po zamontowaniu na płytce stykowej, **11mm**. Widok projektu płytki przedstawiony jest na rysunku 8.

Na rysunku 2 pokazane jest urządzenie w trakcie pomiarów. Uwagę zwracają małe wymiary. Wyświetlacz jest czytelny nawet przy dużych kątach obserwacji.



Rysunek 2. Woltomierz mierzący różne napięcia.

Rozwiązania układowe

Woltomierz ma wejście różnicowe, umożliwia pomiar napięć zewnętrznych jak też własnego napięcia zasilania (przy dowolnej polaryzacji wejść). W układzie wykorzystywany jest przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 18 bitów, komunikujący się z mikrokontrolerem sterującym za pomocą magistrali I²C. Urządzenie pracuje poprawnie z układami MCP 3421 o dowolnym spośród 8 dostępnych adresów, ustawianych na etapie produkcji układu. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie dowolnej aktualnie dostępnej wersji tego przetwornika.

Ze względu na niewielką liczbę dostępnych wyprowadzeń, konieczne stało się wykorzystanie do podłączenia linii SDA i SCL interfejsu I²C wyprowadzeń używanych do sterowania wyświetlaczem. Jest to możliwe dzięki zapewnieniu poniższych warunków:

1. Transmisja odbywa się w czasie przerwy w wyświetlaniu danych na wyświetlaczu (wszystkie segmenty wszystkich cyfr są wtedy wygaszone) i nie jest przerywana aż do zakończenia transmisji.
2. Warunek startu i końca transmisji na liniach interfejsu występuje jedynie w chwilach rozpoczęcia i zakończenia transmisji I²C, a nie występuje w czasie wyświetlania danych na wyświetlaczu.

Wynik pomiaru wyświetlany jest na wyświetlaczu czteropozycyjnym bez dodatkowego znaku „minus”. Do wyświetlania znaku „minus” wykorzystywany jest jeden z segmentów wyświetlacza odpowiadającego „najstarszej” cyfrze. Takie rozwiązanie upraszcza konstrukcję i umożliwia wykorzystanie łatwiej dostępnych elementów, jednak ogranicza rozdzielczość wyświetlania dla wartości ujemnych. Zastosowane rozwiązanie umożliwia uzyskanie następujących **rozdzielczości**:

- 1) dla zakresu od -2V do 10V: **1mV**
- 2) poza zakresem 1), dla zakresu od -20 do 100V: **10mV**
- 3) poza zakresami 1) i 2), dla zakresu od -200 do 200V: **100mV**

Układ zasilany jest napięciem **3,3V**. Układ wyposażony jest w prosty stabilizator napięcia zasilania z diodą Zenera, zapewniający podstawowe zabezpieczenie przed zbyt wysokim napięciem zasilania, bądź odwrotnym podłączeniem napięcia zasilającego. Pobór prądu wynosi około **24mA** – większość prądu zużywana jest przez wyświetlacz LED.

Aby umożliwić pomiar napięć o dowolnej polaryzacji, zastosowane zostało bardzo proste rozwiązanie, polegające na użyciu potencjału masy pozornej – elementy R9, R10, C1 – jako

potencjału odniesienia dla dzielników wejściowych. Konsekwencją tego jest utrzymywanie potencjału spoczynkowego wejść woltomierza na poziomie zbliżonym do połowy napięcia zasilania mierzonym względem masy zasilania woltomierza. Jednak wysoka impedancja wejściowa woltomierza zmniejsza wpływ tego napięcia na badany układ.

Dziwić może obecność tranzystora Q1, okazał się on jednak niezbędny ze względu na znacznie mniejszą wydajność prądową bufora wyjściowego pinu PB3 (pracującego domyślnie jako nóżka RESET) w porównaniu z pozostałymi pinami mikrokontrolera.

Oprogramowanie

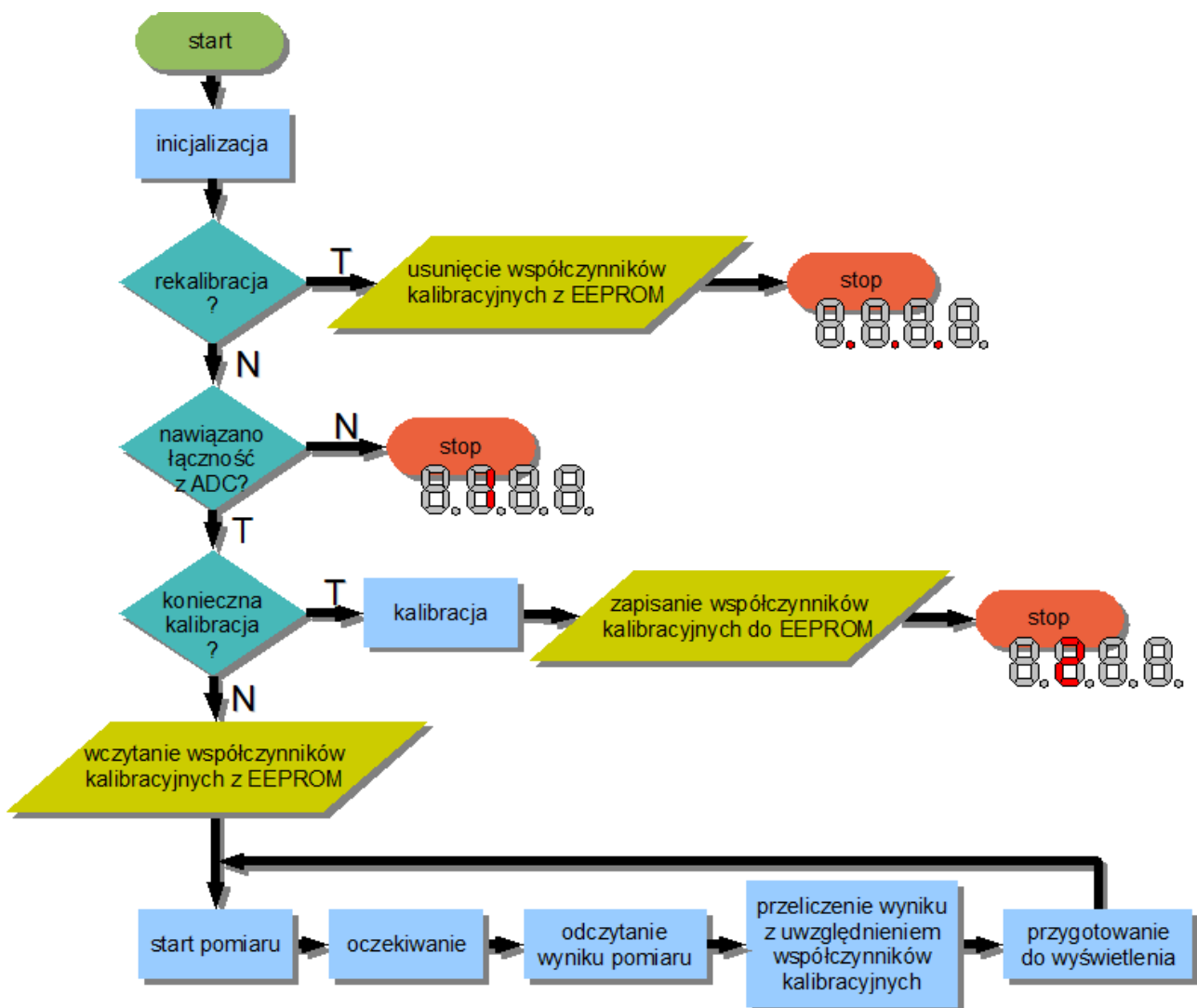
W większości urządzeń zawierających układy programowalne, o funkcjonalności urządzenia decyduje w głównej mierze oprogramowanie. Podobnie jest w tym przypadku. Uproszczony schemat blokowy działania oprogramowania przedstawiony jest na rysunku 4.

Po rozpoczęciu działania urządzenia inicjalizowane są porty mikrokontrolera i wyszukiwany jest adres I²C przetwornika analogowo-cyfrowego, następnie dokonywane jest sprawdzenie, czy dokonana została poprawna kalibracja lub czy należy zresetować ustawienia kalibracyjne. W przypadku braku danych kalibracyjnych uruchamiana jest procedura kalibracji, opisana dalej. W przypadku odnalezienia w pamięci EEPROM poprawnych danych kalibracyjnych urządzenie przechodzi w tryb pomiaru napięcia. W nieskończonej pętli urządzenie cyklicznie pobiera dane z przetwornika, poddaje je odpowiednim przeliczeniom i umieszcza dane wynikowe w pamięci. Z pamięci dane te są z kolei pobierane przez procedurę obsługi wywoływanego około 500 razy na sekundę przerwania wyświetlającego wyniki pomiaru na czteropozycyjnym wyświetlaczu siedmiosegmentowym. Warto podkreślić, że na czas trwania komunikacji z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, ze względu na fakt podwójnego wykorzystania linii danych i zegara I²C, przerwanie odpowiadające za obsługę wyświetlacza jest blokowane, aby nie zakłócić transferu danych.

Dla najniższego zakresu pomiarowego, charakteryzującego się największą rozdzielczością, zmieniane jest ustawienie wzmacniacza pomiarowego znajdującego się wewnątrz przetwornika analogowo-cyfrowego. Wzmocnienie ustawiane jest na 2V/V, zamiast wykorzystywanego w pozostałych zakresach 1V/V. Użycie wzmocnienia 2V/V jest niezbędne w celu zapewnienia faktycznej rozdzielczości woltomierza wynoszącej dla najniższego zakresu 1mV.

Procedura kalibracji

Kalibracja przeprowadzana jest z wykorzystaniem zewnętrznego napięcia o wartości 10V. W przypadku wykrycia braku poprawnych wartości kalibracyjnych uruchamiana jest procedura kalibracji, w której program dokonuje wielokrotnego pomiaru podawanego napięcia i uśrednia wynik. Następnie sprawdzane jest, czy otrzymana wartość kalibracyjna mieści się w założonych granicach. Dzięki temu możliwe jest uniknięcie większości przypadków niepoprawnie przeprowadzonej kalibracji. Kalibracja przeprowadzana jest dla 2 różnych ustawień wzmacniacza o regulowanym wzmocnieniu, znajdującego się wewnątrz przetwornika MCP3421. Prowadzona jest odrębna kalibracja dla wzmocnienia 1V/V i 2V/V, jedna po drugiej. W pierwszej kolejności kalibrowane jest wzmocnienie 1V/V, po czym wyświetlana jest wartość kalibracyjna. Następnie wyświetlacz jest wyłączany i przeprowadzana jest kalibracja dla wzmocnienia 2V/V, po zakończeniu której wyświetlana jest wartość kalibracyjna. W tym momencie konieczne jest wyłączenie zasilania woltomierza. Po ponownym jego włączeniu układ powinien przystąpić do dokonywania normalnych pomiarów.



Rysunek 4. Schemat działania oprogramowania.

Konstrukcja

Na początkowym etapie konstrukcji konieczne jest zdecydowanie, jakie napięcie wykorzystywane będzie do zasilania woltomierza. W układzie zawarty jest bowiem prosty układ stabilizatora (elementy D1, R15). W modelowym egzemplarzu przewidziano zasilanie napięciem 3,3V. W przypadku wykorzystania innego napięcia zasilania (jednak nie niższego niż około 2,7V), konieczne jest zastosowanie rezystora R15 o innej wartości. Dla napięć niższych niż 3,3V może on zachować wartość 10 omów, jednak dla napięć wyższych konieczne jest wyliczenie jego wartości za pomocą przybliżonego wzoru zamieszczonego poniżej:

$$R15 = \left(\frac{U_{zasilania} - 3,3V}{40mA} + 10 \right) \Omega$$

Warto w tym momencie podkreślić, że zastosowane w układzie rezystory o rozmiarze 0402 mają bardzo ograniczoną maksymalną moc strat, około 60mW. Nie można zatem przekroczyć wartości napięcia zasilania skutkującej wydzielaniem takiej mocy na rezystorze R15. Wydzielaną moc

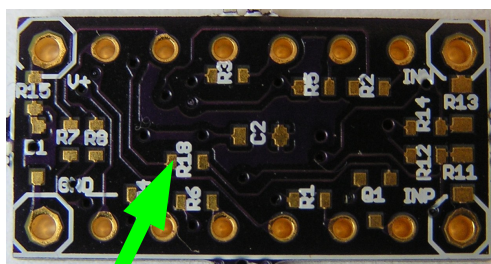
wyznacza się ze wzoru:

$$P_{R15} = \frac{(U_{zasilania} - 3,3 V)^2}{R15} W$$

Oznacza to, że w praktyce maksymalne napięcie zasilania (przy użyciu rezystora R15 o odpowiedniej wartości) nieznacznie przekracza 5V. W celu zastosowania napięcia zasilania o większej wartości, należy szeregowo z układem włączyć rezystor o odpowiedniej wartości rezystancji i mocy.

W dalszej kolejności należy wlutować elementy, schemat montażowy widoczny jest na rysunku 9. Zalecane jest rozpoczęcie od wlutowania mikrokontrolera w obudowie QFN i sprawdzenie poprawności połączeń. Najwygodniej chyba wlutować układ z użyciem pasty lutowniczej i lutownicy na gorące powietrze do przylutowania środkowego pada, a następnie używając cienkiej cyny i topnika w dużej ilości przylutować 20 wyprowadzeń mikrokontrolera. Nieuchronny w takim wypadku nadmiar cyny należy zebrać za pomocą plecionki. Metoda taka okazuje się w warunkach amatorskich bardziej niezawodna niż lutowanie mikrokontrolera wyłącznie pastą lutowniczą i lutownicą na gorące powietrze, ze względu na trudność w dozowaniu pasty i powstające w wyniku tego zwarcia pod spodem obudowy mikrokontrolera. Problemów takich da się zapewne uniknąć przy wykorzystaniu odpowiedniego sita do nakładania pasty lutowniczej.

Po weryfikacji poprawności lutowania mikrokontrolera należy wlutować pozostałe elementy za wyjątkiem wyświetlacza, zworek R16, R17 i rezystora R18. Do padu rezystora R18 położonego bliżej mikrokontrolera należy wlutować krótki odcinek kynaru lub innego cienkiego drutu – będzie on niezbędny w procesie programowania (patrz rysunek 5).

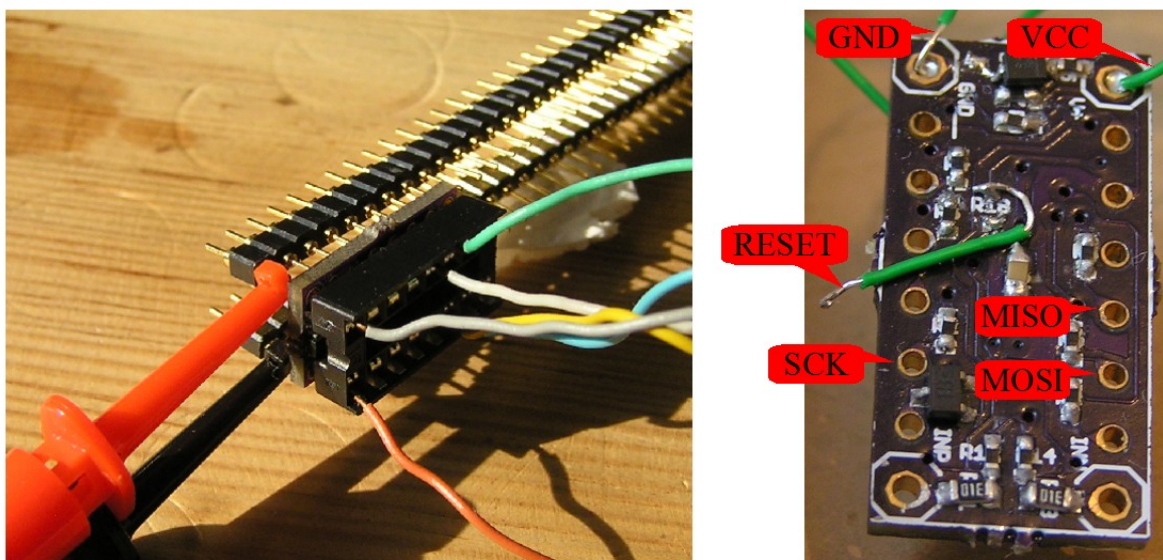


Rysunek 5. Miejsce lutowania drutu RESET

W kolejnym kroku należy podłączyć programator ISP – nóżki MISO, MOSI, SCK do odpowiednich pól lutowniczych przygotowanych dla wyświetlacza, RESET do wspomnianego wcześniej drucika oraz VCC i GND do szyn zasilania. Pomocny może się tu okazać sposób podłączenia za pomocą 18 pinowej podstawki pod układy DIP oraz goldpinów dociskających, jak zostało to pokazane na rysunku 6.

UWAGA!

W oryginalnym rozwiązaniu Atmela pin oznaczony jako VCC w złączu programatora jest WEJŚCIEM programatora i służy do mierzenia napięcia zasilania i odpowiedniegoysterowania buforów programatora. Zastosowanie wynalazków „dostarczających zasilanie do programowanego układu” podających 5V na tym pinie może (choć nie powinno w krótkim czasie) skutkować uszkodzeniem programowanego urządzenia lub programatora.



Rysunek 6. Podłączenie programatora ISP. Chwytyki dostarczają zasilanie do układu.

Po poprawnym zaprogramowaniu (z weryfikacją) pamięci programu oraz pamięci EEPROM mikrokontrolera, należy przystąpić do zmiany ustawień fusebitów. Należy zaprogramować:

- układ brownout na napięcie 2,7V – nie jest to ustawienie domyślne, trzeba zmienić,
- zegar na wewnętrzny – jest to ustawienie domyślne – nie trzeba zmieniać,
- podział zegara przez 8 (CKDIV8) – jest to ustawienie domyślne – nie trzeba zmieniać,
- wyłączyć obwód zewnętrznego resetu (RSTDISBL) – nie jest to ustawienie domyślne, trzeba zmienić, patrz punkt „UWAGA!” niżej.

UWAGA!

Po tym kroku ponowne przeprogramowanie za pomocą programatora ISP będzie niemożliwe, konieczne będzie użycie programatora wysokonapięciowego (na przykład AVR Dragon). Urządzenie nie jest jednak przystosowane do podłączania programatora wysokonapięciowego. Należy zatem dokładnie sprawdzić poprawność wszystkich ustawień przed zaprogramowaniem fusebitów.

Można również zaprogramować bit EESAVE, zapobiegający czyszczeniu pamięci EEPROM w razie przeprogramowywania układu. Pozostałe fusebity należy pozostawić bez zmian. Ostatecznie należy zaprogramować poniższe wartości fusebitów (rysunek 7).

Fuse	Value
SELFPRGEN	<input type="checkbox"/>
RSTDISBL	<input checked="" type="checkbox"/>
DWEN	<input type="checkbox"/>
SPIEN	<input checked="" type="checkbox"/>
WDTON	<input type="checkbox"/>
EESAVE	<input checked="" type="checkbox"/>
BODLEVEL	Brown-out detection at VCC=2.7 V ▼
CKDIV8	<input checked="" type="checkbox"/>
CKOUT	<input type="checkbox"/>
SUT_CKSEL	Int. RC Osc. 8 MHz; Start-up time PWRDWN/RESET: 6 CK/14 CK + 64 m.▼
<hr/>	
EXTENDED	0xFF
HIGH	0x55
LOW	0x62

Rysunek 7. Ustawienia fusebitów (AVR Studio 4)

Kolejno należy wlotować wyświetlacz oraz zworki R16, R17 i rezystor R18 i skontrolować wszystkie połączenia.

Jeśli montaż i programowanie przeprowadzone były poprawnie, można włączyć zasilanie, nie podłączając żadnego napięcia wejściowego. Po pewnym czasie (kilkanaście sekund) na wyświetlaczu powinien pojawić się kod błędu 2, oznaczający niepoprawnie przeprowadzoną kalibrację. Należy wtedy odłączyć zasilanie, podłączyć napięcie kalibrujące 10V (użyłem układu LT1019-10) – uwaga na poprawną polaryzację napięcia kalibrującego – i ponownie włączyć zasilanie. Kolejno zmierzone i pokazane na wyświetlaczu zostaną 2 wartości kalibracyjne w następującej sekwencji:

1. wyświetlacze wygaszone (kilka sekund),
2. wyświetlanie wartości kalibracyjnej dla wzmocnienia 1V/V (kilka sekund),
3. wyświetlacze wygaszone (kilka sekund),
4. wyświetlanie wartości kalibracyjnej dla wzmocnienia 2V/V (ciągłe).

Wyznaczone wartości zostaną automatycznie zapamiętane w pamięci EEPROM. Należy teraz wyłączyć zasilanie i włączyć je ponownie. Układ powinien teraz przystąpić do normalnej pracy i wyświetlać wartość mierzonych napięć.

Kody błędów i komunikaty

W trakcie uruchamiania pojawić się mogą błędy lub komunikaty, sygnalizowane na wyświetlaczu. Poniżej pokazane zostały kody i prawdopodobne przyczyny wystąpienia oraz znaczenie komunikatów.

Wyświetlacz	Znaczenie
	Błąd komunikacji z przetwornikiem ADC. Prawdopodobne przyczyny: <ul style="list-style-type: none"> • nieprawidłowo wlotowane zworki R16 i/lub R17, • nieprawidłowo wlotowany układ MCP3421, • nieprawidłowo wlotowany układ ATTiny44a (zwarcia, brak kontaktu).
	Błąd kalibracji. Prawdopodobne przyczyny: <ul style="list-style-type: none"> • podanie błędnego napięcia kalibrującego (powinno być dokładnie 10V) w trakcie pierwszego uruchomienia bądź po rekaliibracji, • odwrotne podłączenie napięcia kalibrującego, • błąd montażu obwodów wejściowych, • złe wartości rezystorów, • źle wykonane połączenia w dzielniku wejściowym.
	Komunikat o usunięciu danych kalibracyjnych. W trakcie kolejnego uruchomienia konieczna rekaliibracja. Prawdopodobne przyczyny, jeśli nie jest to pożądane zachowanie: <ul style="list-style-type: none"> • zwarcie PA0 z masą.

Obsługa

W celu skasowania wartości kalibracyjnych i ponownego przeprowadzenia procesu kalibracji, należy przed włączeniem zasilania zewrzeć pin PA0 (lub, prościej, nóżkę 12 wyświetlacza) z masą układu po czym włączyć zasilanie. Na wyświetlaczu pojawią się kropki. Teraz należy odłączyć zasilanie. Przy kolejnym włączeniu konieczne będzie przeprowadzenie kalibracji.

Urządzenie powinno być utrzymywane w czystości i nie powinno być bezpośrednio dotykane palcami od spodniej strony – docierające z dzielnika do przetwornika napięcia są małe i zanieczyszczenia powodują duże zakłócenia odczytu. Zmiana wyświetlanej wartości o 1mV na najniższym zakresie oznacza zmianę napięcia wyjściowego z dzielnika o około 10μV.

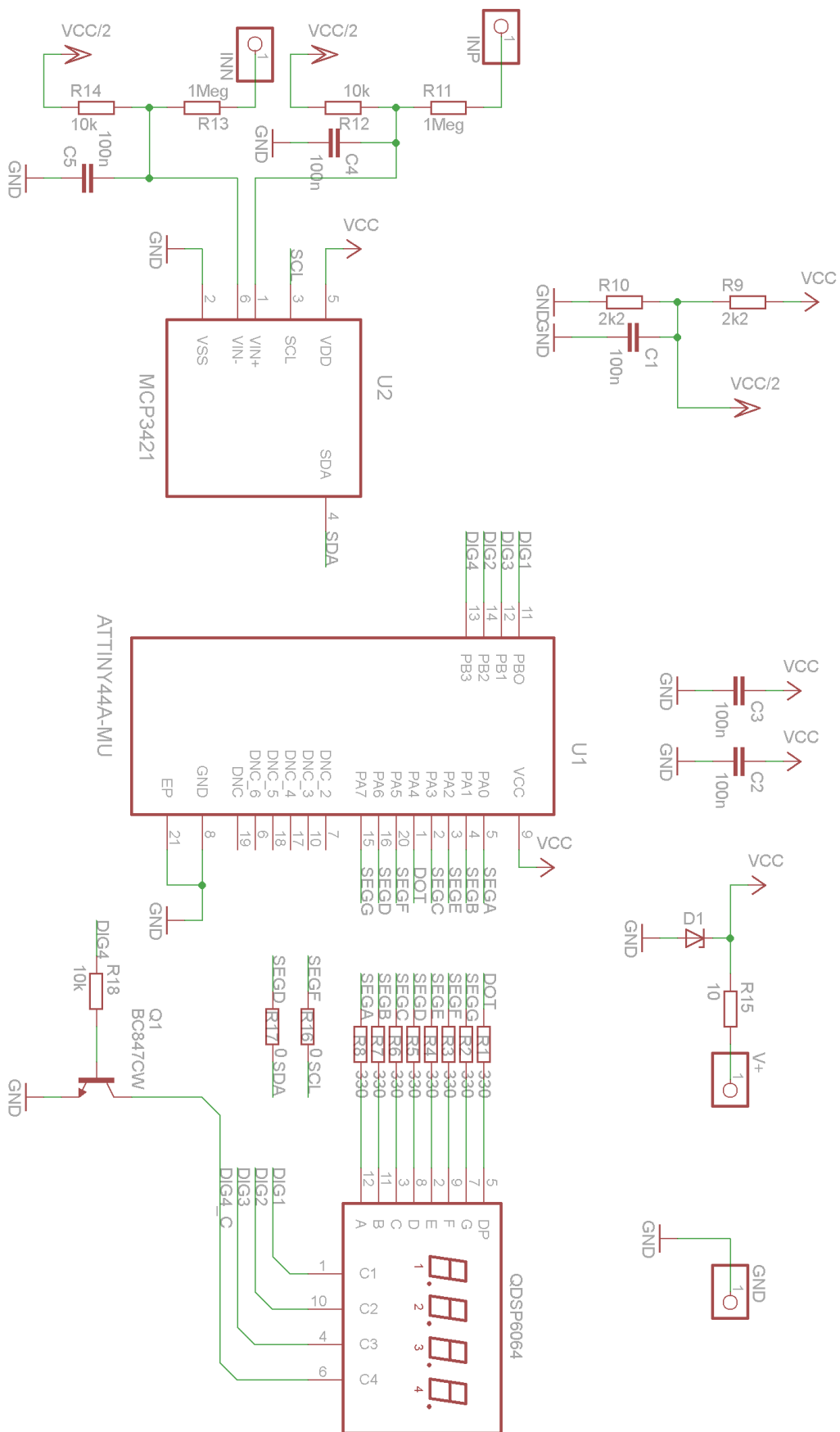
Zmierzone osiągi

Wykorzystując posiadany sprzęt pomiarowy, oszacowałem, że dokładność pomiaru napięcia przy poprawnej kalibracji mieści się w zakresie poniżej $\pm 1\%$. Ze względu na zastosowanie w dzielniku napięcia wejściowego rezystorów o dokładności 1% bez ich dobierania, układ charakteryzuje się wrażliwością na napięcie współbieżne podawane na wejścia różnicowe. Wpływ napięcia współbieżnego, mierzonego względem masy układu, na pomiar oszacowany został w egzemplarzu modelowym na około 2mV/V.

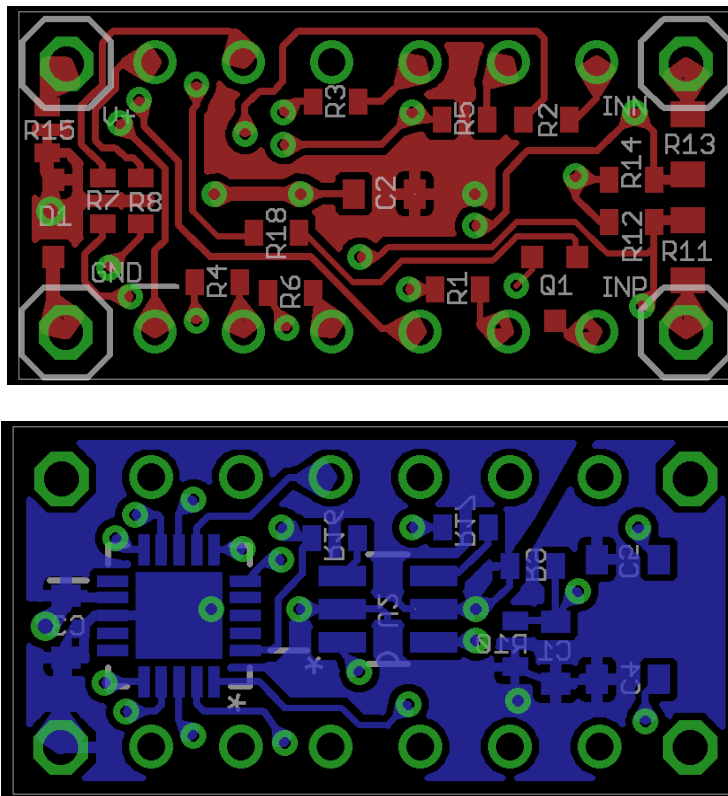
Podsumowując – układ jest prostym i nieskomplikowanym woltomierzem napięcia stałego, okazał się być użytecznym narzędziem pozwalającym szybko (i z zadowalającą dokładnością i rozdzielczością) określić wartość napięcia w budowanym układzie. Koszt jednostkowy budowy (elementy, płytka) zamyka się w kwocie poniżej 50 zł.

Tabela 1. Spis elementów

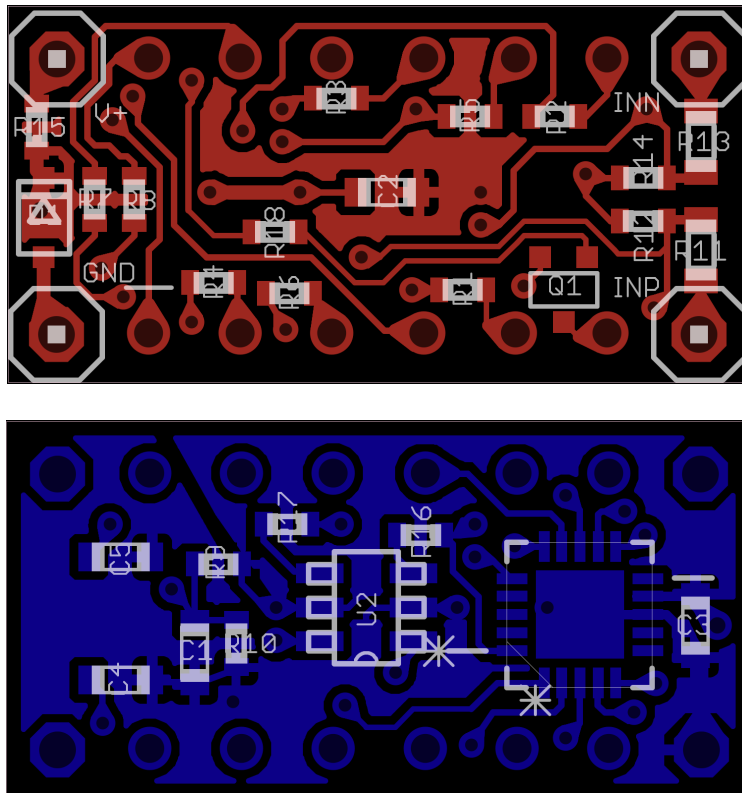
Typ i wartość	Liczba	Obudowa	Numery części
Rezystor 0Ω	2	0402	R16, R17
Rezystor 10Ω	1	0402	R15
Rezystor 10kΩ	3	0402	R12, R14, R18
Rezystor 1MΩ	2	0603	R11, R13
Rezystor 2,2kΩ	2	0402	R9, R10
Rezystor 330Ω	8	0402	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8
Kondensator 100nF	5	0603	C1, C2, C3, C4, C5
Dioda Zenera 3V3	1	SOD-323	D1
Mikrokontroler ATTINY44A-MU	1	QFN-20	U1
Tranzystor BC847CW	1	SOT-323	Q1
Przetwornik ADC MCP3421	1	SOT-23-6	U2
wyświetlacz LED QDSP-6064	1	DIP12	LED1



Rysunek 3. Schemat układu woltmierz



Rysunek 8. Warstwa górna (u góry) i dolna (na dole) projektu płytki drukowanej



Rysunek 9. Położenie elementów na warstwie górnej (góra) i dolnej – odbicie lustrzane (dół)