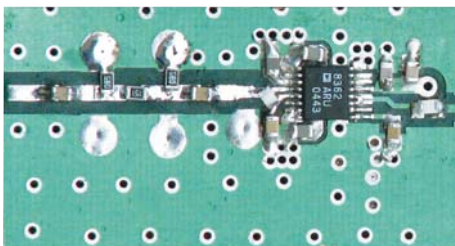


# Mikroprocesorowy miernik mocy i dopasowania

Jednym z trudniejszych zadań w praktyce radioamatorskiej okazuje się pomiar mocy. Istnieje szereg rozwiązań tego problemu, zaczynając od detektorów diodowych, poprzez detektory termiczne na specjalizowanych układach scalonych kończąc. Każde z rozwiązań ma swoje wady i zalety, np.: detektory diodowe charakteryzują się wysoką częstotliwością pracy sięgającą dziesiątek GHz, prostotą aplikacji, ale do ich wad należy niski zakres liniowości, wynoszący maksimum 30dB (bez użycia specjalnych układów kompensujących nieliniowość charakterystyki diody) i wrażliwość na kształt mierzonego przebiegu. Detektory termiczne charakteryzują się dużym skomplikowaniem mechanicznym układu, małym zakresem dynamiki, silnym wpływem temperatury na wynik pomiaru, ale mają najszerszy

zakres częstotliwości pracy, są również z zasady działające detektorami wartości skutecznej. Detektory scalone mają największy zakres dynamiki, wynoszący często powyżej 85dB, szeroki zakres częstotliwości pracy (ale mniejszy niż detektory termiczne czy diodowe), mają również prosty układ aplikacyjny. Ze wzrostem maksymalnej częstotliwości pracy układu scalonego maleje zakres dynamiki, jaką posiada dany układ, i tak na przykład spotyka się detektory scalone o paśmie 500MHz i dynamice 90dB, natomiast układy o maksymalnej częstotliwości mierzonej 10GHz mają zakres dynamiki wynoszący maksimum 40dB. Detektory scalone mają najczęściej charakterystykę liniową w dB, to znaczy wzrost siły sygnału o np. 1dB powoduje zawsze taki sam przyrost napięcia wyjściowego. Firmą, która posiada najszerszy wybór układów detektorów scalonych, jest bez wątpienia Analog Devices. W opisanym układzie zastosowano detektor scalony typu AD8362 z pomiarem wartości skutecznej (True RMS).

(1mW) mają wartość dodatnią, poniżej 0dBm (1mW) wartość ujemną i tak sygnał  $-10\text{dBm}$  oznacza moc równą 0,1mW,  $+10\text{dBm}$  to moc równa 10mW. Znacząc wzmacnienie (tłumienie) układu wyrażone w dB i poziom mocy na wejściu np. wzmacniacza, w bardzo prosty sposób jesteśmy w stanie obliczyć moc na jego wyjściu, np.: jeśli na wejściu wzmacniacza mamy sygnał o poziomie  $-20\text{dBm}$ , wzmacniacz ma wzmacnienie 15dB, w układzie włączono filtr pasmowoprzepustowy o tłumieniu 5dB, to poziom sygnału na wyjściu układu wyniesie:  $-20\text{dBm}$  (poziom sygnału wejściowego) + 15dB (wzmacnienie wzmacniacza) - 5dB (tłumienie filtra) =  $-10\text{dBm}$  (poziom sygnału wyjściowego).



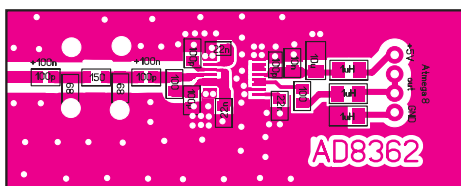
## Jednostki używane w pomiarze mocy

Przeglądając kartę katalogową zastosowanego układu AD8362 zauważymy, że jego czułość podawana jest w dBm. Warto się z tą jednostką mocy lepiej zapoznać, gdyż jest ona powszechnie używana w technice w.cz. i znakomicie ułatwia wykonywanie wszelkich obliczeń. W dBm wyraża się moc odniesioną w dB do 1 mW. Poziomowi 1mW odpowiada wartość 0dBm. Sygnały powyżej 0dBm

## Detektor mocy

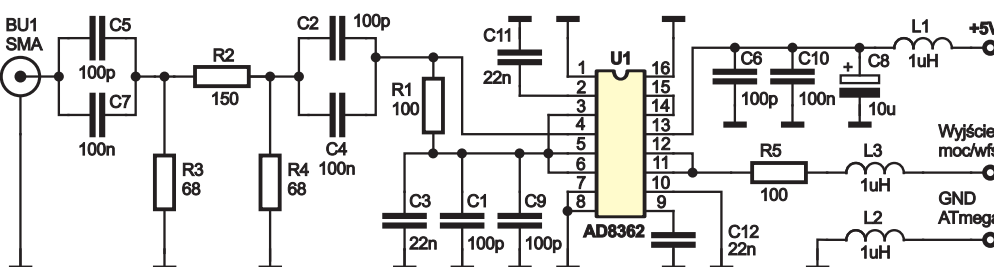
Zastosowany układ detektora mocy AD8362 przedstawia rysunek 1, a jego schemat montażowy - rysunek 2. Detektor wyróżnia się maksymalnym zakresem częstotliwości pracy równym 3,5GHz i dynamiką sięgającą 60dB. Przyrost napięcia na wyjściu wynosi 50mV na dB. Układ pracuje poprawnie w zakresie od 1MHz do 750MHz, za ograniczenie pasma odpowiedzialne są rezonanse pasozytne zastosowanych elementów i konfiguracja niesymetryczna wejścia. W celu osiągnięcia maksymalnie wysokiej częstotliwości pracy całość układu zmontowano z użyciem elementów 0805. Dla zdecydowanej większości użytkowników powyższe parametry są bardziej niż wystarczające. Dodatkową zaletą tego układu jest pomiar wartości skutecznej. Detektory diodowe będące detektorami szczyto-

wymi dają błędy przy pomiarze przebiegów odkształconych względem sinusoidalnego sięgające nieraz kilkudziesięciu procent. Nota katalogowa układu AD8362 zaleca użycie go w konfiguracji z symetrycznym wejściem. Rozwiązanie takie może być trudne do wykonania w praktyce amatorskiej. Głównym problemem w tym wypadku będzie kupno (wykonanie) transformatora symetryzującego. Nota



Rys. 2

Rys. 1

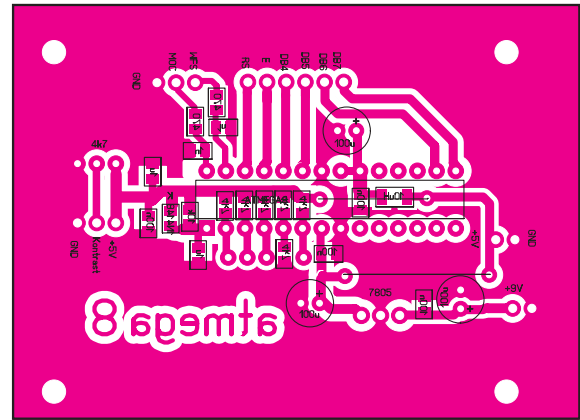


katalogowa wskazuje jednak na możliwość użycia układu w konfiguracji z wejściem niesymetrycznym. Przy zasilaniu sygnałem niesymetrycznym impedancja własna układu wynosi około 100Ω. W tym wypadku do wejścia układu podłączamy równolegle oporniki o wartości 100Ω, by otrzymać wypadkową wartość 50Ω. Wartość impedancji 50Ω jest standardowo używana w technice wysokich częstotliwości, impedancję taką mają powszechnie stosowane, kable czy złącza w.c.z.. Na wejściu układu znajduje się tłumik typu π o wartości tłumienia około 16dB. Ogranicza on minimalny poziom sygnału mierzonego do około -37dBm, rozszerza jednak poziom mierzonego sygnału w górę do ponad 20dBm. Wejście sprzężone jest z tłumikiem przez równoległe połączone kondensatory o wartościach 100 pF i 100nF, montowane jeden na drugim. Na spodzie montowany jest kondensator o pojemności 100pF. Taka kombinacja zapewnia szeroki zakres częstotliwości pracy całego układu. Metalizowane otwory o średnicy 2,5mm w pobliżu elementów tłumika wypełniamy roztopioną cyną, przez co przelotka ma bardzo małą indukcyjność. Większe moce mogą być mierzone dzięki zastosowaniu odpowiedniego tłumika czy sprzęgacza kierunkowego. W przypadku stosowania zewnętrznego tłumika należy pamiętać, że powinien on przynieść odpowiednią moc. Najlepiej jest wykonać od razu dwie identyczne sondy, co umożliwi pomiar nie tylko mocy, ale i dopasowania w układzie. Zewnętrzna sonda ułatwi szybką wymianę uszkodzonej sondy bez konieczności natychmiastowej ingerencji w uszkodzony układ (można zastosować drugą z sond do pomiaru mocy). W praktyce najwięcej pomiarów, jakie wykonujemy, to właśnie pomiary mocy. Jak pokazuje praktyka, najczęściej uszkodzeniom ulegają oporniki tłumika, a przyczyna jest zawsze jedna: nieuwaga. Sondy najlepiej połączyć za pomocą dwuzyłowego przewodu stereo-fonicznego w ekranie. Jako złącza najlepiej wykorzystać 2 złącza stereo-foniczne typu minijack 3,5mm, umożliwi to automatyczne zwieranie wejścia 27 procesora do masy (przetwornik analogowo cyfrowy) w przypadku, gdy nie wykorzystujemy układu do pomiaru dopasowania. Złącze minijack stereo umożliwia automatyczne zwieranie dwóch wyprowadzeń po wyjściu wtyku. W układzie tłumika zastosowano elementy wielkości 0805, zastosowanie elementów wielkości 0603 pozwoli lepiej zabezpieczyć układ. Jako gniazda w.c.z. najlepiej stosować jest gniazda typu SMA ze względu na wymiary i bardzo pewny kontakt złącza (gwintowane połączenia mas zapewniające doskonały kontakt elektryczny). Układy sond najlepiej umieścić w

zewnętrznej obudowie metalowej połączonej kablem ekranowanym z częścią mikroprocesorową. Użyte w układzie dławiki zapobiegają przenoszeniu zakłóceń na część mikroprocesorową, szczególnie podczas pomiaru dużych mocy. Sondy najlepiej montować bezpośrednio na złączu wyjściowym urządzenia, lub w przypadku urządzeń eksperymentalnych, łączyć je jak najkrótszym odcinkiem kabla koncentrycznego, przylutowanego bezpośrednio do układu mierzonego. Każdy kabel pomiarowy, jaki stosujemy przy pomiarach, a zwłaszcza cienki, wnosi istotne tłumienie, szczególnie przy wyższych częstotliwościach. Najlepsze do naszych celów są kable teflonowe, które można kupić w okazyjnej cenie np. na Allegro, gdyż znoszą bez szkody dla siebie wielokrotne lutowania i nie topi się w nich izolacja między żyłą gorącą a ekranem. Płytki sond wykonane są z laminatu szklano-epoksydowego o grubości 0,8mm.

### Część procesorowa

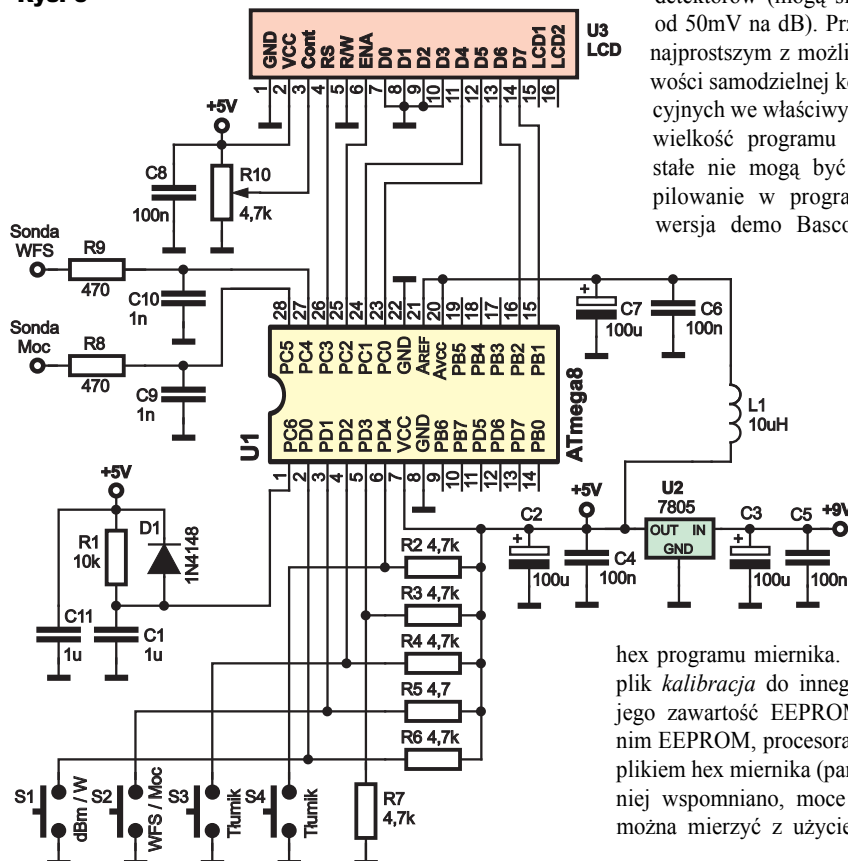
Program napisany został w języku Bascom i można go ściągnąć z Elportalu. Jak widać na rysunku 3, w układzie użyto procesora Atmega8. Schemat montażowy płytki przedstawia rysunek 4. Fusy procesora powinny być tak ustawione, by wymusić pracę z wewnętrznym oscylatorem RC z częstotliwością taktowania równą 8MHz. Potencjometrem 4,7kΩ ustawiamy kontrast wyświetlacza LCD. Pomiar mocy



Rys. 4

dokonywany jest w zakresie od -37 do +20dBm. Powyżej tego zakresu spada dokładność wskazań. Miernik ma możliwość korekcji parametrów układów AD8362, czynność ta nie powinna być jednak wykonywana w przypadku osób nieposiadających odpowiedniego zaplecza pomiarowego. Jak pokazuje praktyka, odtwarzalność parametrów układów AD8362 jest bardzo dobra i można się kierować charakterystyką podaną w nocie katalogowej. Największą dokładność uzyskamy po kalibracji obu sond pomiarowych, trzeba jednak posiadać w tym wypadku wzorec mocy i szereg tłumików. Układ ma wstępnie wpisane w pamięci EEPROM stałe kalibracyjne oznaczone odpowiednio jako a, b, d, e. Umożliwiają one samodzielne skorygowanie wartości, jaka ma pokazywać się przy braku sygnału wejściowego (poziom zerowy detektora) i nachylenie charakterystyki obu detektorów (mogą się one różnić niewiele od 50mV na dB). Przyjęte rozwiązanie jest najprostszym z możliwych. Nie ma możliwości samodzielnej korekcji stałych kalibracyjnych we właściwym pliku hex programu, wielkość programu wynosi ponad 6kB i stałe nie mogą być samodzielnie wkompiłowane w program (ogólnie dostępna wersja demo Bascoma ma ograniczenia do 4kB kodu wynikowego). Procedura wgrzywania stałych kalibracyjnych jest następująca: wpisujemy do pliku kalibracja stałe korygujące, kompilujemy program, powstały plik hex zapisuje odpowiednio wartości w EEPROM-ie, a następnie wgrzywamy właściwy plik hex programu miernika. Można również wgrać plik kalibracja do innego procesora, odczytać jego zawartość EEPROM-u i zaprogramować nim EEPROM, procesora z wgranym wcześniej plikiem hex miernika (pamięć flash). Jak wcześniej wspomniano, moce większe od +20dBm można zmierzyć z użyciem tłumika lub sprzę-

Rys. 3





gacza. Wartość tłumienia (sprzęgania) można ustawić w zakresie od 0 do 30dB z krokiem 1dB, co rozszerza zakres pomiarowy powyżej +50dBm (100W). Program wyświetla aktualną wartość mocy w dBm lub w mW (oraz w jednostkach pochodnych jak:  $\mu$ W, mW, nW lub W, w zależności od zakresu, z dokładnością do jednej lub dwóch cyfr znaczących). Liczba cyfr znaczących zależy od zakresu pomiarowego. Przelączanie jednostek, w jakich wyświetlana jest moc, realizowane jest przelącznikiem stabilnym, tak samo wykonywany jest wybór trybu pracy (pomiar mocy, pomiar dopasowania). Przelącznikami chwilowymi ustawia się wartość tłumienia tłumika lub sprzężenie sprzęgacza kierunkowego. Drugim parametrem, jaki możemy mierzyć, jest wartość współczynnika fali stojącej – WFS, często stosowana jest również nazwa angielska tego parametru: SWR. Do pomiaru dopasowania potrzebne są dwie sondy i element nazwany sprzęgaczem kierunkowym. W uproszczeniu można przyjąć, że umożliwia on określenie, jaka część energii przekazywana jest z układu do obciążenia (np. następnego stopnia wzmacniacza czy anteny), a jaka odbija się i powraca do źródła sygnału. Występowanie zjawiska fali stojącej jest niekorzystne, gdyż świadczy o istnieniu zjawiska niedopasowania energetycznego w układzie (impedancja źródła nie jest równa impedancji obciążenia), a w przypadku większych mocy może doprowadzić do uszkodzenia np. tranzystora wzmacniacza mocy (moc odbita wydzieli się w stopniu poprzednim). Wartość współczynnika fali stojącej podaje się w postaci paru parametrów, takich jak gamma, WFS, czy tłumienie odbicia. Najpowszechniej z nich stosowanym jest WFS (SWR). Im wartość WFS jest bliższa jedności, tym lepiej układ dopasowany jest do obciążenia. Przyjmuje się, że w przypadku bardzo dobrego dopasowania wartość WFS nie powinna przekraczać 1,3; dobrego 1,5, a takiego, które może być jeszcze bez problemu akceptowalne: 2. WFS równy 2 oznacza, że około 10% mocy nie wydzieli się w obciążeniu i pojawi się w postaci fali odbitej. Przyjęte wartości WFS i ich określenia jako *bardzo dobre*, *dobrze*, czy *akceptowalne* są określeniami względnymi i arbitralnymi. Według autora dużo lepszym i znacznie więcej mówiącym parametrem jest wielkość nazywana tłumieniem odbicia (z angielskiego *return loss*). Mówi nam ona, o ile dB fala odbita jest mniejsza od fali padającej i przy odrobinie wprawy w rachunku decybelowym znacznie bardziej przemawia do wyobraźni niż współczynnik fali stojącej. Wybór odpowiedniego trybu pomiaru dopasowania (WFS, tłumienie odbicia) dokonywany jest za pomocą opornika konfiguracyjnego podłączonego do pinu 5 procesora (montujemy tylko jeden z rezystorów 4,7k $\Omega$ ). Przy pomiarze

dopasowania ważne jest prawidłowe podłączenie sond. Sonda, która służy do pomiaru mocy, używana jest do pomiaru fali padającej, druga z sond służy do pomiaru fali odbitej. W przypadku odwrotnego podłączenia sond (zamienione ze sobą porty fali padającej z odbitą) układ poinformuje nas o tym. Układ sygnalizuje również przekroczenie zakresu mocy mierzonej, gdy poziom sygnału na wyjściu detektora przekroczy wartość 3,2V, opcja ta działa zarówno w przypadku pomiaru dopasowania, jak i mocy. Dużą zaletą proponowanego układu jest wysoka czułość zastosowanych sond (do -37dBm), co umożliwi pomiar dopasowania już przy mocy wyjściowej generatora równej 0dBm, a z mniejszą dokładnością nawet od poziomu (-5dBm), przy sprzężeniu sprzęgacza na poziomie -15dB. Podczas pomiaru dopasowania możemy jednocześnie obserwować moc wyjściową układu.

### Sprzęgacze kierunkowe

Podstawowym parametrem charakteryzującym układ sprzęgacza jest wartość sprzężenia mówiąca, o ile dB sygnał na wyjściu sprzęgacza jest słabszy względem sygnału wejściowego. Konstrukcja sprzęgacza kierunkowego zależy od częstotliwości, na jakiej pracuje dany układ. Dla małych poziomów mocy i niskich częstotliwości zwykle stosuje się sprzęgacze wykonane na rdzeniach z materiałów ferromagnetycznych. Ze wzrostem wymiarów rdzenia rośnie moc, jaka może być przeniesiona przez sprzęgacz. Maleje jednak maksymalna częstotliwość pracy. Przy starannym nawinięciu sprzęgacza i zastosowaniu materiału o odpowiednich parametrach, możliwe jest pokrycie pasma od kilku do ponad pięciuset megaherców. Sprzęgacze można zarówno kupić, jak i wykonać samemu. Dla większych mocy i większych częstotliwości sprzęgacze wykonuje się zwykle w postaci linii mikropaskowych. Sprzęgacze na wyższe pasma (większe moce) są szczególnie proste, gdyż jego funkcję pełni tylko wytrawiona płytko laminatu i dwa rezystory 51 $\Omega$ . Przykłady wykonania różnych sprzęgaczy można bez liku znaleźć w Internecie po wpisaniu hasła *sprzęgacz kierunkowy* lub *directional coupler transformer*, *directional coupler*. Każdy bez problemu znajdzie konstrukcję najbardziej mu pasującą. Dobrze wykonany sprzęgacz ma równe wartości sprzężenia pomiędzy poszczególnymi wejściami i dobrą kierunkowość. Po obciążeniu impedancją znamionową na wyjściu sprzęgacza wartość WFS powinna być jak najbliższa jedności (tłumienie odbicia powinno być maksymalnie duże, układ charakteryzuje się dobrą kierunkowością). Prawidłowo wykonany sprzęgacz jest elementem odwracalnym, to znaczy po zamianie wejścia z wyjściem układu, wyjście, na którym pojawiała się fala padająca, pełni rolę wyjścia fali odbitej i na odwrót: wyjście fali odbitej funkcję pełni wyjścia fali padającej. Po odwróceniu sprzęgacza powinien pokazy-

wać taką samą lub zbliżoną wartość SWR co przed zamianą wejść. W przypadku zbyt dużego poziomu mocy na wyjściu sprzęgacza należy stłumić go tłumikami (pomiar dużych mocy, silne sprzężenie sprzęgacza). Kalkulator, który pozwala obliczyć dowolne wartości tłumienia, znajduje się np. w programie QUCS. Płytki prototypowe różnią się od płytek końcowych ze względu na wprowadzone modyfikacje układowe, które zastosowano w wersji finalnej. Na zakończenie chciałbym podziękować firmie Analog Devices i jej polskiemu przedstawicielstwu Alfine z Poznania za nieodpłatne udostępnienie próbek układów AD8362.

Rafał Orodziński SQ4AVS

sq4avs@gmail.com

#### Literatura:

Wolfgang Shneider DJ8ES, *Low power radio frequency wattmeter (dBm) using an AD8362 detector*, *VHF Communications* 3/2005  
<http://michaelgellis.tripod.com/direct.html>  
<http://www.analog.com>  
[http://www.analog.com/static/imported-files/Data\\_Sheets/AD8362.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/AD8362.pdf)

#### Wykaz elementów

##### Sonda na AD8362 (wykonujemy 2 identyczne układy)

##### Rezystory

R1,R5 ..... 100 $\Omega$  (0805)  
 R2 ..... 150 $\Omega$  (0805)  
 R3,R4 ..... 68 $\Omega$  (0805)

##### Kondensatory

C1,C2,C5,C6,C9 ..... 100pF (0805)  
 C3,C11,C12 ..... 22nF (0805)  
 C4,C7,C10 ..... 100nF (0805)  
 C8 ..... 10 $\mu$ F/10V (1206)

##### Półprzewodniki

U1 ..... AD8362

##### Pozostałe

L1-L3 ..... 1 $\mu$ H (1008)

##### Płytko procesora Atmega 8

##### Rezystory

R1 ..... 10k $\Omega$  (0805)  
 R2,R4-R6 ..... 4,7k $\Omega$  (0805)  
 R3,R7 ..... 4,7k $\Omega$  – w danej chwili może być zastosowany tylko 1 rezystor (0805)  
 R8,R9 ..... 470 $\Omega$  (0805)  
 R10 ..... 4,7k $\Omega$  potencjometr wieloobrotowy

##### Kondensatory

C1,C11 ..... 1 $\mu$ F (0805)  
 C2,C3,C7 ..... 100 $\mu$ F/16V  
 C4-C6,C8 ..... 100nF (0805)  
 C9,C10 ..... 1nF (0805)

##### Półprzewodniki

D1 ..... 1N4148 (minimelf)  
 U1 ..... ATmega8  
 U2 ..... 7805  
 U3 ..... LCD 2x16 znaków

##### Pozostałe

L1 ..... 10 $\mu$ H (1008)  
 S1,S2 ..... stabilny  
 S3,S4 ..... chwilowy zwierny

Płytko drukowana jest dostępna w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2924.



tej i na odwrót: wyjście fali odbitej funkcję pełni wyjścia fali padającej. Po odwróceniu sprzęgacza powinien pokazy-