

kit

2999

AVT

# Minikombajn Pomiarowy

Każdy elektronik potrzebuje czasem dokonać pomiarów, w których nie wystarczy już zwykły multimetr. Podczas uruchamiania urządzeń, najczęściej analogowych, niezbędny bywa oscyloskop i generator funkcyjny. Nie każdy elektronik może pozwolić sobie na zakup tych urządzeń. Jednak przy uruchamianiu prostych układów rzadko potrzebne są dokładne pomiary i kilkudziesięciomegahercowy zakres częstotliwości. Często oscyloskop i generator może zastąpić karta dźwiękowa komputera. Ale czy zakres 20Hz – 20kHz wystarczy? A co, jeśli potrzebujemy zmierzyć np. przebieg 50kHz na tranzystorze kluczującym w przetwornicy impulsowej? Jak sprawdzić, czy nadajnik podczerwieni generuje nośną 36kHz? Jak upewnić się, że nasz dopiero co uruchomiony wzmacniacz nie wzbudza się na ultradźwiękach?

A może przy uruchamianiu regulatora obrotów silnika DC potrzebny będzie testowy generator PWM? Do czego innego potrzebny będzie inny generator, np. przebiegu sinusoidalnego. Pewnie dojdziemy do wniosku, iż trzeba zrobić własne urządzenia pomiarowe. Budowa cyfrowego oscyloskopu i generatora DDS o niewygórowanych parametrach w ostatnich latach nie jest tak wielkim problemem, jak dawniej. Potrzebujemy tylko kilku wzmacniaczy operacyjnych, multiplexerów i drabinki rezystorów. Później filtr antyaliasingowy, no i wreszcie przetwornik analogowo-cyfrowy w przypadku oscyloskopu bądź cyfrowo-analogowy, jeśli budujemy generator. Całością będzie sterował jakiś popularny mikrokontroler. Na

koniec jeszcze ładny wyświetlacz i panel z klawiaturą. No i gotowe!

Z pozoru wszystko jest proste, ale jak się tak bliżej przyjrzyć, to jednak wychodzi sporo elementów. Już nie wspominając o fakcie, że przy uruchamianiu i kalibracji naszego dzieła i tak będziemy potrzebowali, o zgrozo, oscyloskopu i generatora. W przeciwnym razie urządzenie będzie działało „tak sobie” lub w najgorszym wypadku wcale nie będzie miało na to ochoty.

Przydałby się gotowy, skalibrowany moduł zawierający w sobie wyżej wymienione elementy. Wprawdzie tzw. układy PSoc są temu bliskie, jednak mniej bardziej zaciekały najnowsze mikrokontrolery AVR – XMEGA. Może pomyślisz, drogi Czytelniku, że to jakaś pomyłka lub kpina. Przecież od dawna są dostępne o wiele wydajniejsze i tańsze mikrokontrolery ARM. Kto by się zachwycał „8-bitowcami”.

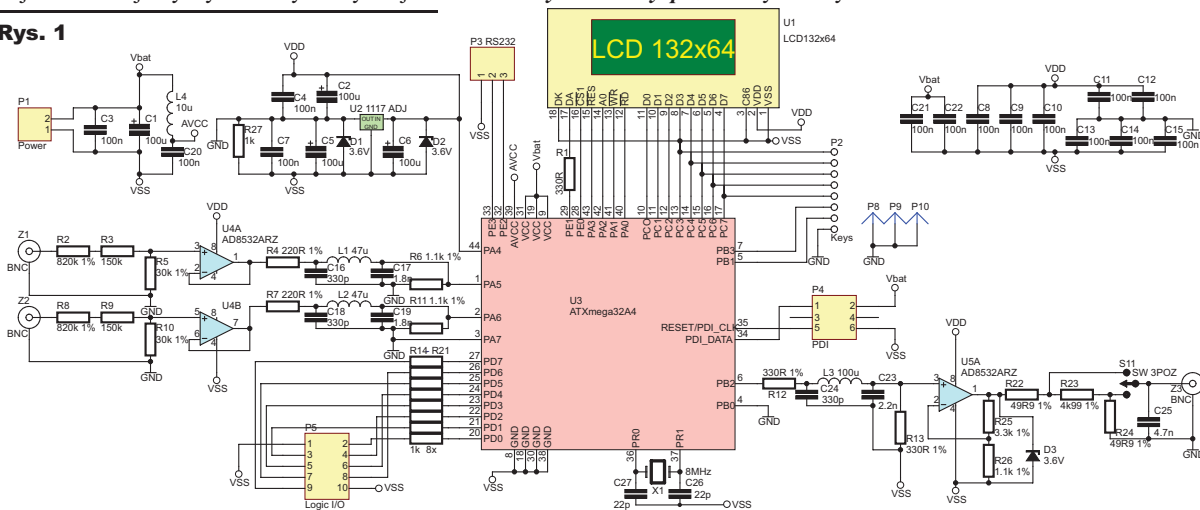
A jednak! Te małe „stworki” mają coś, czego jeszcze w trakcie pisania tego tekstu nie posiadają żadne 32-bitowe mikrokontrolery ARM ani żadne inne ogólnego zastosowania. Tym czymś jest **wbudowany 12-bitowy prze-**

**twornik A/C o częstotliwości próbkowania 2MS/s**, który ma programowalne wzmocnienie 1 – 64x. A to oznacza ni mniej, ni więcej, że mamy gotowe multipleksery, a tak w zasadzie – gotowy cały tor pomiarowy. Potrzebny będzie tylko zwykły dzielnik rezystorowy na wejściu. No i warto zostawić filtr antyaliasingowy. Drugą ważną cechą, dość rzadko spotykaną w ARM-ach, jest przetwornik C/A. W XMEGA jest, i to nie byle jaki, bo również 12-bitowy, o częstotliwości próbkowania 1MS/s.

Widząc to, postanowiłem wykonać prezentowany dalej **Minikombajn Pomiarowy**. To nie tylko oscyloskop i generator. Zawiera on zestaw narzędzi, przydatnych przy uruchamianiu większości prostych układów elektronicznych. Połączenie obu tych urządzeń daje takie możliwości, jak pomiar charakterystyki badanego układu, filtrów oraz elementów RLC. Dodatkowo do dyspozycji jest analizator widma sygnału, multimetr oraz analizator stanów logicznych. I to wszystko na jednym małym mikrokontrolerze AVR XMEGA!

## część 1

Rys. 1



Zapraszam więc do lektury poniższego artykułu wszystkich, którzy chcą mieć cały system pomiarowy w jednej dłoni.

## Opis układu

Na początku proszę, żeby nie traktować *Minikombajnu Pomiarowego jak profesjonalnego urządzenia pomiarowego*, choć na pewno będzie on bardzo przydatny przy uruchamianiu wszelkich hobbystycznych układów. A teraz przejdźmy do podstaw.

Urządzenie składa się z kilku narzędzi pomiarowych, których parametry pokazuje tabela 1. Schemat ideowy przedstawiony jest na rysunku 1 – płyta główna, oraz rysunku 2 – klawiatura matrycowa 2x5 z diodami, które zapobiegają zwarciom i pozwalają na poprawny odczyt z kilku klawiszy naciśniętych równocześnie. Główny schemat jest dużo bardziej rozbudowany. Można na nim wyróżnić kilka bloków: zasilanie, układ wejściowy ADC, układ wyjściowy DAC, złącze I/O oraz interfejs użytkownika. Całością zarządza mikrokontroler ATXMEGA32A4.

**Zasilanie.** Podczas analizy schematu obwody zasilania mogą wydawać się bardzo dziwne. Otóż wszystkie układy peryferyjne zasilane są z mikrokontrolera, stąd VDD połączone jest z pinem PA4. Pozwala to znacznie ograniczyć prąd, wyłączając urządzenia programowo. Dzięki temu przy zasilaniu bateryjnym nie jest potrzebny dodatkowy wyłącznik mechaniczny. Sam mikrokontroler zasilany jest bezpośrednio ze złącza Power. Dodatkowo AVCC jest filtrowane poprzez dławik L4 i kondensator C20. Niepokój budzi zapewne podłączenie masy do wyjścia stabilizatora U2. Ale spokojnie, jest to niezwykle sztuczna masa. Układ 1117ADJ posiada możliwość regulacji napięcia wyjściowego od 1,25V i takie też napięcie występuje pomiędzy końcówkami OUT i ADJ, gdyż nóżka ADJ jest podłączona od razu do masy. Zasada działania taka jak w LM317. Podsumowując: napięcie pomiędzy GND a VSS wynosi 1,25V, więc przy zasilaniu napięciem około 3V, napięcie pomiędzy VDD a GND będzie wynosić 1,75V. To w zupełności wystarczy do poprawnej pracy układów analogowych i przetwornika ADC. Takie rozwiązanie ze sztuczną masą znacząco upraszcza cały układ, gdyż nie są potrzebne dodatkowe linie zasilające lub konwertery napięcia ujemnego.

Diody Zenera D1 i D2 chronią przed przepięciami, mogącymi pojawić się przy nieprawidłowym wykorzystaniu układu. Założymy taką sytuację: ktoś przypadkiem podał sygnał o dużej amplitudzie na wyjście generatora Z3. Dioda D3 będzie ograniczała impulsy o amplitudzie wyższej niż 3,6V, ale uwaga(!), między wyjściem a VSS! Jak widać, prąd wpływający do wyjścia Z3 będzie wypływał masą – bo musi tu być obwód zamknięty. Stabilizator U2 będzie dzielnie sprzeciwiał się wszelkim zmianom, ale tylko do pewnego

momentu. Jeżeli prąd na wyjściu generatora, czyli także na masie, przekroczy 20mA, pin PA4 mikrokontrolera przestanie sobie z nim radzić i 1117ADJ będzie miał zbyt niskie napięcie na wejściu. Potencjał między masą a VSS będzie malał, aż w końcu zmieni polaryzację i wyniesie około -0,6V. Wtedy do akcji wkroczy dioda D1 spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Sytuacja zostanie opanowana. Jeżeli masz problemy z wyobrażeniem sobie tej sytuacji, spójrz na rysunek 3. Została tam przedstawiona sytuacja, gdy na wyjściu pojawia się impuls o odwrotnej polaryzacji. W tym przypadku napięcie między masą a VSS będzie się zwiększać i stabilizator nic na to nie poradzi. Wynika to z zasady jego działania. Dioda D2 pełni podobną funkcję i chroni przed przepięciami dostającymi się przez kondensatory filtrujące, głównie C2 i C5. Wprawdzie jest to już sytuacja skrajna, ale lepiej dmuchać na zimne. Na koniec wspomnę jeszcze o tym, że układ 1117ADJ do poprawnej pracy wymaga obciążenia wstępnego, dlatego pojawił się rezystor R27.

### Tor sygnałów wejściowych.

Minikombajn Pomiarowy ma dwa kanały dla badanych sygnałów. Oba są identyczne, więc zajmijmy się jednym z nich. Sygnał ze złącza Z1 trafia na dzielnik złożony z rezystorów R2, R3 i R5 o impedancji wejściowej 1MΩ. Na wejście wtórnika U4 wędruje napięcie podzielone 33 razy. AD8532 jest wzmacniaczem Rail to Rail, czyli zdolnym do pracy w całym zakresie napięć zasilających. A więc zarówno na wejściu, jak i wyjściu może pojawić się poziom VSS lub VDD. Skoro potencjał między GND a VSS wynosi 1,25V, to można założyć, że maksymalna amplituda sygnału wejściowego nie powinna przekraczać  $1,25V \cdot 33 = 41,25V$ . Dla pewności przyjmijmy 40V. Z zastosowaniem sondy 10x będzie to odpowiednio 400V. Za wtórnikiem znajduje się 3-biegunowy filtr dolnoprzepustowy RLC. Składają się na niego elementy R4, R6, C16, C17 i L1. Częstotliwość graniczna tego filtru wynosi 330kHz. W ten sposób zredukowane

## Tabela 1. Parametry urządzenia:

### Zasilanie:

- napięcie: 3V – 3,6V, pobór prądu: praca 35mA – 40mA, w stanie spoczynku <50μA.

### Oscyloskop:

- rozdzielczość pionowa: 12 bitów
- 2 kanały, każdy o paśmie analogowym 300kHz
- próbkowanie: 1 kanał – 1Ksample @2MS/s, 2 kanały – 2 x 512sample @1MS/s
- podstawa czasu: 2us...50ms (2us, 5us z interpolacją sinc)
- wzmacnienie: 50mV – 5V/działkę dla sondy 1x
- zakres mierzonych napięć: ±40V, zabezpieczenie wejść do ok. 1kV, impedancja 1MΩ

### Generator arbitralny:

- rozdzielczość pionowa: 12 bitów
- próbkowanie: 512sample @1MS/s
- przebiegi domyślne: sinus, prostokąt, piłokształtny, szum różowy, szum biały, arbitralny
- zakres częstotliwości: 1Hz – 500kHz
- napięcie wyjściowe: 0 – 2,5Vpp bez obciążenia, dodatkowy tłumik 100x.
- impedancja wyjść: 50Ω, zabezpieczenie od ok. ±8V (±20V przez kilka sekund)
- regulacja wypełnienia: 1%...99%
- regulacja offsetu: max ±1,2V
- modulacja FM i AM, 0...200%
- przemiatanie częstotliwości, stosunek  $f_{max}/f_{min} \leq 200$
- możliwość zapisu dowolnego przebiegu i jego edycja

### Analizator widma:

- rozdzielczość pionowa: 12 bitów
- próbkowanie: 1Ksample, 512-punktowa Real-FFT, częstotliwość końcowa: 160Hz – 1MHz

### Analizator stanów logicznych:

- próbkowanie: 8kanałów, 2Ksample, 500S/s – 4MS/s.

### Wobuloskop:

- pomiar charakterystyki metodą przemiatania częstotliwości, impulsem Diraca i szumem białym

### Multimetr:

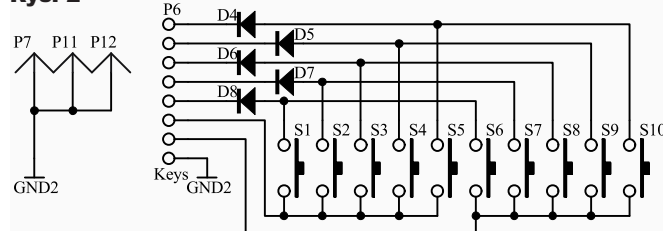
- pomiar napięć: True RMS, wartości średniej, wartości maksymalnej oraz minimalnej
- pomiar częstotliwości

### Komunikacja przez RS232:

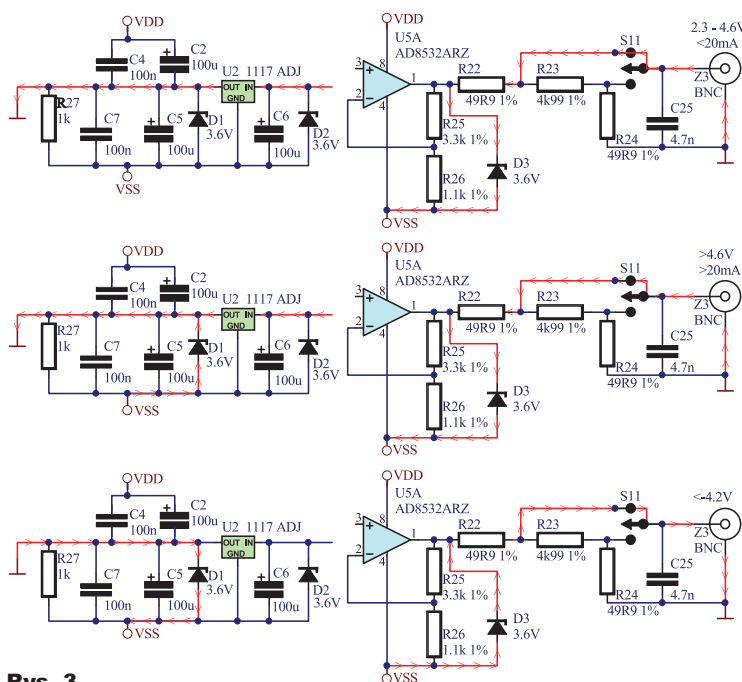
- prędkość przesyłania danych 19200 – 1,5Mb/s
- program komputerowy do obsługi urządzenia dla systemów Linux i Windows

zostaje zjawisko aliasingu dla najwyższych częstotliwości próbkowania. Z twierdzenia Kotelnikowa-Shannona wynika, że częstotliwość próbkowania powinna być przynajmniej dwukrotnie wyższa niż najwyższa harmoniczna sygnału, zwana także częstotliwością Nyquista. To zagadnienie najlepiej wyjaśnia rysunek 4. Powiedzmy, że podajemy na wejście przetwornika ADC przebieg (linia czerwona) o trochę niższej częstotliwości

Rys. 2







Rys. 3

niż wynosi próbkowanie (czarne punkty). W efekcie zamiast oryginalnego sygnału zobaczymy inny o dużo mniejszej częstotliwości (linia niebieska). Jak to się ma do powyższego filtra? Otóż dla 330kHz tłumienie wynosi 3dB, czyli niewiele. Jako że jest to filtr 3-biegunowy, charakterystyka opada 18dB/oktawę. To znaczy, że dla częstotliwości 660kHz tłumienie wyniesie już 21dB (18dB + 3dB). To jeszcze nie tak dużo. Za to dla częstotliwości 1MHz tłumienie to już około 36dB, czyli jakieś 60x. Taki przebieg będzie prawie niewidoczny na wyświetlaczu urządzenia. Warto również wspomnieć, że dzielniki wejściowe nie są skompensowane częstotliwościowo. Nie jest to wcale wadą. Wręcz przeciwnie, razem z pojemnością wejściową wzmacniacza operacyjnego taki dzielnik tworzy dodatkowy filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej około 600kHz. W efekcie pasmo przepustowe toru wejściowego wynosi około 300kHz i otrzymujemy bardzo dobre tłumienie wyższych składowych sygnału. Czyli można z grubsza przyjąć, że filtr całkowicie tłumi częstotliwości powyżej 1MHz, a więc zgodnie z powyższym twierdzeniem powinniśmy próbować sygnał z częstotliwością przynajmniej 2MS/s, aby uniknąć aliasingu. Na tyle pozwala ADC wbudowany w mikrokontroler. Przetwornik ten pracuje w trybie differential. Pin odniesienia to PA7. Jest on podłączony do masy sygnałowej, co względem „masy”

ści po pomnożeniu przez wejściowy dzielnik rezystorowy, maksymalny sygnał, jaki może pojawić się na złączu Z1, to  $1,18V \cdot 33,3 = 39,3V$  (amplituda).

No dobrze, wróćmy do przetwornika analogowo-cyfrowego. Dzięki pracy różnicowej możemy skorzystać z wbudowanego mnożnika i dodatkowo wzmocnić sygnał 2x, 4x, 8x, 16x, 32x oraz 64x. Reszta funkcji, takich jak wyzwalanie czy przesuwanie poziomu sygnału, realizowana jest programowo. I w ten oto sposób, otrzymujemy kompletny tor wejściowy.

**Tor wyjściowy.** Na pierwszy rzut oka wygląda on jak lustrzane odbicie toru wejściowego. Sygnał cyfrowy zostaje tu przekształcony na analogowy. Napięcie referencyjne DAC pobierane jest z masy układu – pin PB0. W przypadku ADC punktem odniesienia była masa sygnałowa. Tutaj sygnałem odniesienia jest po prostu ujemny biegun zasilania mikrokontrolera VSS. Stąd zakres napięć na wyjściu DAC wynosi 0...+1,25V względem VSS. Sygnał z wyjścia PB2 trafia na filtr dolnoprzepustowy RLC, również 3-biegunowy, lecz o częstotliwości granicznej 500kHz. Po podaniu sygnału prostokątnego o częstotliwości 500kHz, na wyjściu uzyskamy ładną sinusoidę. Fala prostokątna składa się z nieparzystych harmonicznych, a wyższe harmoniczne zostaną mocno tłumione. Pierwsza harmoniczna, z jaką musi się uporać filtr, to dopiero 1,5MHz. Możemy łatwo wyliczyć, że tłumienie dla tej częstotliwości wyniesie 39dB, czyli prawie 100x. Uwzględniając fakt, że amplituda drugiej harmonicznej to 1/3 pierwszej, daje w wyniku zniekształcenia na poziomie 0,34%. Nieźle, jak na taki prosty układ. Gdy chcemy uzyskać niższe częstotliwości, np. 300kHz,

wtedy sytuacja nie wygląda już tak różowo. Przy sygnale prostokątnym 300kHz zniekształcenia na wyjściu filtra wyniosą ponad 4%. Na szczęście poniżej 250kHz sytuacja wygląda lepiej. Zniekształcenia nagle stają się znów bardzo małe. A to dlatego, że zamiast sygnału prostokątnego na wyjściu PB2 pojawi się „sinusopodobny” sygnał złożony z czterech schodków. Częstotliwość próbkowania przetwornika cyfrowo-analogowego wynosi maksymalnie 1MHz, dlatego dla częstotliwości z zakresu 250kHz – 500kHz można wygenerować tylko dwa poziomy. Wprawdzie poniżej 330kHz zmieszczą się 3, ale mogłyby się pojawić kłopoty z symetrią przebiegu. Pozostawmy więc przy parzystej liczbie. I tak w miarę zmniejszania częstotliwości liczba poziomów zwiększa się.

Wzmacniacz U5A wzmacnia sygnał 4-krotnie, a filtr tłumi sygnał dwukrotnie (dzielnik R12–R13). Czyli maksymalne napięcie za wzmacniaczem to  $1,25V / 2 \cdot 4 = 2,5V$ . Nie zapomnij, że na razie jest to napięcie względem VSS! Gdy ustawimy DAC dokładnie w połowie skali, na wyjściu uzyskamy +1,25V względem VSS, czyli 0V względem masy sygnałowej GND. Uzyskujemy w ten sposób generator o amplitudzie maksymalnej  $\pm 1,25V$  względem masy.

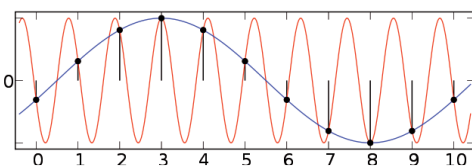
Za wzmacniaczem operacyjnym znajduje się jeszcze rezystor 49,9Ω, co daje wyjściową impedancję około 50Ω. Mamy tam też dodatkowy dzielnik rezystorowy o tłumieniu 100x, który można włączyć przełącznikiem S11. Tuż przed samym złączem znajduje się jeszcze kondensator. Wraz z rezystorem R22 lub R24 tworzy on kolejny filtr dolnoprzepustowy. Częstotliwość graniczna wynosi 677kHz. Dzięki temu, w okolicach 250 – 300kHz, zamiast wspomnianych zniekształceń powyżej 4%, ostatecznie otrzymujemy 2%. Dla znacznie niższych częstotliwości całkowite zniekształcenia harmoniczne sygnału sinusoidalnego nie przekraczają 0,3%.

Podobnie jak w oscyloskopie, takie parametry jak wzmocnienie czy przesunięcie poziomu sygnału są realizowane programowo. Muszę jeszcze ostrzec przed próbą „wyciągnięcia” 50mA z wyjścia generatora. W takim wypadku nóżka PA4 bezlitośnie ograniczy swój prąd i w efekcie na wyjściu otrzymamy około 18mA.

**Port wejść/wyjść logicznych.** W jego skład wchodzi złącze P5 oraz rezystory R14 – R21 o wartości 1kΩ. W aktualnym programie port ten wykorzystywany jest w analizatorze stanów logicznych. Ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby go zastosować do sterowania bądź monitorowania innych urządzeń.

**Interfejs użytkownika.** Do wyświetlania wszelkich danych wykorzystano popularny graficzny wyświetlacz LCD o rozdzielczości 132x64 ze sterownikiem SPLC510C. Ma podświetlenie LED, które sterowane jest sygnałem PWM na pinie PE1 z włączonym szeregowo

Rys. 4



rezystorem R1. Do portu wyświetlacza podłączona jest także klawiatura. Jej stan jest odczytywany, gdy LCD jest nieaktywny. Na kolejnych pinach PC3–PC7 ustawiany jest stan niski, a następnie sprawdzana jest wartość na pinach PB1 i PB3. Wykorzystujemy multiplexowanie, tak jak w złożonych wyświetlaczach LED, przez co możemy zaoszczędzić kilka wyprowadzeń. Pisząc już o interfejsach, warto wspomnieć, że do dyspozycji jest także port RS232. Dzięki aplikacji komputerowej możemy sterować kombajnem i odczytywać z niego dane. Ale o tym napiszę na koniec.

**Serce, czyli ATXMEGA32A4** z 32KB pamięci FLASH, 4KB SRAM i 1KB EEPROM. Mikrokontroler taktowany jest sygnałem 32MHz, uzyskiwanym dzięki pętli PLL z rezonatora kwarcowego 8MHz. Pamięć FLASH ledwie starczyło na implementację wszystkich funkcji. Natomiast SRAM zajmują głównie bufor sygnałów. Na bufor wejściowy przeznaczono 2KB, co daje 1024 próbki 16-bitowe. W przypadku analizatora jest to 2048 próbek 8-bitowych. Bufor wyjściowy zajmuje 1KB, czyli 512 próbek 16-bitowych. Sygnały można przechowywać także w pamięci EEPROM. Mieści się w niej również 512 próbek, z tą tylko różnicą, że są one 12-bitowe. Taka „kompresja” jest jak najbardziej wskazana, gdyż tutaj ważniejsza jest ilość miejsca, a nie prędkość zapisu i odczytu. Dzięki temu dane zajmują tylko 768 bajtów, pozwalając wykorzystać pozostałe 256 bajtów do innych celów. A tych wcale nie brakuje. W pamięci EEPROM przechowywane są także zmienne kalibracyjne oraz ogólne ustawienia.

## Program

Kod programu składa się z kilkunastu plików źródłowych w języku C. Na każde narzędzie przypada osobny plik, dzięki czemu program jest bardziej przejrzysty. Myślę, że mimo pisania pod kątem optymalizacji rozmiaru i szybkości, kod będzie strawny. Opiszę teraz poszczególne narzędzia, przy okazji prezentując skrótkowo program. Szczegółowe informacje można znaleźć w komentarzach do kodu.

**Oscyloskop.** Próbkowanie odbywa się z wykorzystaniem kontrolera DMA. W tym czasie mikrokontroler zostaje wprowadzony w stan uśpienia IDLE. Pozwala to, przynajmniej teoretycznie, ograniczyć szumy generowane wewnątrz procesora. Gdy transfer zostanie zakończony, DMA zgłosi przerwanie i mikrokontroler przejdzie do normalnej pracy. Następnie program wchodzi do pętli, w której sprawdza, czy zaszły warunki wyzwalania. Jeżeli tak, to odpowiednia część sygnału zostaje przepisana do bufora wyświetlacza i w dalszej części wyświetlona. W przeciwnym wypadku program wykonuje się dalej, bez zmiany tego bufora. Nie ma co ukrywać: procedura wyzwalania jest dosyć skomplikowana. Przed wejściem w pętlę sprawdzany

jest tryb wyzwalania oraz liczba kanałów. W samej pętli badany jest sygnał pod kątem rodzaju zbrocza, szybkości narastania, a także poziomu napięcia. Przy przepisywaniu do bufora brana jest pod uwagę również pozycja w pionie i poziomie oraz korekta wzmocnienia. Czyli wszystko, co powinno znaleźć się w przyzwoitym oscyloskopie. W przypadku pracy z podstawą czasu 5µs i 2µs zostaje również przeprowadzona interpolacja sygnału. Jest to nic innego, jak tylko wstawienie dodatkowych próbek zerowych sygnału między istniejące oraz filtracja dolnoprzepustowa z wykorzystaniem odpowiedzi impulsowej sinc. Dla niewtajemniczonych dodam, że chodzi po prostu o filtr o bardzo dobrych parametrach, którego charakterystyka opadania jest niemal pionowa. Całą procedurę ilustruje **rysunek 5**. Szczegółów nie będę omawiał. Docieklivym radzę zajrzeć do literatury i zapoznać się z takimi zagadnieniami, jak splot, filtry nierekursywne, funkcja sinc, a także interpolacja i decymacja. Pozostałą część kodu zajmują głównie instrukcje odpowiedzialne za ustawianie różnych parametrów i nawigację.

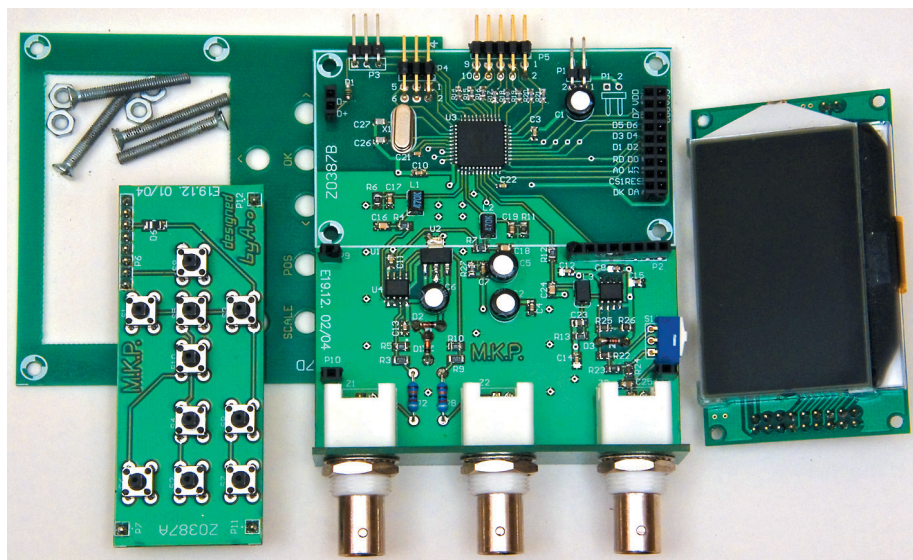
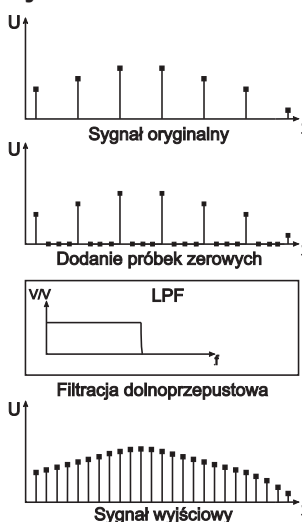
**Generator.** Tutaj również skorzystałem z kontrolera DMA, co niesamowicie ułatwiło program. Próbkę wysyłane są nieprzerwanie. Rozmiar bufora waha się od 2 do 512 i zależy od częstotliwości. Próbkę wysyłane są jakby w tle, bez ingerowania w wykonywany właśnie program. Tak samo program nie przeszkadza w wysyłaniu tych próbek, z jednym tylko wyjątkiem. Gdy zostaje zmieniona długość bufora, DMA jest inicjowane od nowa w celu aktualizacji parametrów. Może się to przejawiać szpilkami na wyjściu podczas zmiany częstotliwości powyżej około 2kHz. Dla

wyjaśnienia: próbkowanie wynosi maksymalnie 1MS/s, długość bufora to 512 próbek. Stąd  $1\text{MS/s} / 512\text{S} \approx 2\text{kHz}$ . Przy niższych częstotliwościach wyjściowych zmniejszana jest po prostu częstotliwość próbkowania, co nie wymusza żadnej ingerencji w transfer DMA. Ta częstotliwość ustalana jest timerem, którym wyzwalany zostaje przetwornik DAC. Oczywiście powyżej 2kHz nie można zwiększyć już próbkowania, więc pozostaje tylko zmniejszenie rozmiaru bufora. Skoro już omawiamy ten temat, wyjaśnię od razu, dlaczego wybór częstotliwości wygląda na tak skomplikowany. Jeżeli chcemy zwiększyć lub zmniejszyć częstotliwość, to program wchodzi do pętli, następnie wykonuje dziwne obliczenia i po jakimś czasie „wypluwa” wynik. Dzieje się tak dlatego, że korzystając z liczb naturalnych, nie możemy uzyskać dowolnej częstotliwości, a jedynie pewien skończony zbiór. Od czego więc zależy końcowa częstotliwość? Ano i od próbkowania, i od długości bufora.  $\text{Częstotliwość} = \text{próbkowanie} / \text{długość bufora}$ . A jak ustalana jest szybkość próbkowania? To zależy od przerwań timera.

Timer pracuje z częstotliwością zegara procesora, a więc 32MHz. Aby próbkowanie wynosiło 1MHz, okres timera musi wynosić 32. Ostatecznie nasze równanie ma postać:  $\text{częstotliwość} = 32 / (\text{okres timera} * \text{długość bufora})$ . Okres timera może przyjmować wartości od 32 do 65535, a długość bufora jak już pisałem – 2 do 512. Jak widać, ostateczna częstotliwość jest kombinacją tych liczb. I właśnie te dwie pętles for dobierają wartości tak, aby uzyskać częstotliwość jak najbliższą oczekiwanej

Przypominam, że chodzi o zakres 2kHz – 500kHz i że

Rys. 5





dla niższego zakresu bufor zawsze ma 512 próbek. Uff, przebrnęliśmy przez dość trudny fragment generatora. Mógłbym oczywiście pisać dalej, jak wygląda synteza przebiegu, a w szczególności szumu białego i różowego, ale odpuśćmy sobie tę mękę. W przypadku tworzenia standardowych przebiegów, jak sinus, prostokąt czy piła, pomogą komentarze w programie – nie ma tam w gruncie rzeczy nic skomplikowanego. Inaczej wygląda sprawa z szumem. Nie da się ot tak w kilku słowach wyjaśnić działania tych algorytmów bez znajomości podstaw statystyki, a w szczególności generacji liczb pseudolosowych i rozkładu Gaussa. Tutaj zainteresowanych również odsyłam do literatury. Wspomnę tylko, że szum generowany jest na bieżąco w pętli, a nie jak reszta sygnałów, które zapisywane są do bufora, który ma tylko 512 próbek, co bardzo ograniczyłoby pasmo częstotliwościowo szumu.

Amplitudę sygnału reguluje się poprzez zmianę generowanego przebiegu. Niestety przetwornik cyfrowo-analogowy nie ma żadnych sprzętowych wzmacniaczy, jak to było w przypadku ADC mikrokontrolera. Wprawdzie dałoby się regulować wzmacnienie, sterując napięciem referencyjnym, ale to wiąże się ze zmianą całego toru wyjściowego. Cały układ stałby się przez to znacznie bardziej skomplikowany. Nie wspomnę już o potrzebie zastosowania kolejnego przetwornika do sterowania tym pierwszym... Dlatego ja zdecydowałem się na programową regulację wzmacnienia. Dodatkowo można osłabić sygnał 100x przełącznikiem S11.

Przejdźmy do tematu modulacji. Mamy do dyspozycji modulację AM oraz FM. Do jednego worka wrzuciłem też przemiatanie SWEEP, gdyż pod względem programowym wygląda to podobnie. Do modulacji wykorzystałem dodatkową pętlę. W jej wnętrzu zostaje odczytana wartość ADC, a następnie w zależności od wyboru, proporcjonalnie zmienia się amplituda bądź częstotliwość generowanego przebiegu. W przypadku przemiatania zamiast wartości z przetwornika analogowo-cyfrowego, wpływ na generowany sygnał ma specjalna zmienna. Jest ona inkrementowana do pewnej wartości, wybieranej przez użytkownika.

**Analizator.** Sercem analizatora jest dyskretne przekształcenie Fouriera, a tak naprawdę jego szybka wersja – FFT. Jak wiadomo, standardowo algorytm ten pracuje na sygnałach zespolonych, a my tu takich nie używamy. Tak więc, aby jeszcze bardziej przyspieszyć wykonywanie tego bardzo skomplikowanego algorytmu i zwiększyć długość widma, wykorzystałem rzeczywiste FFT. Szczegóły znacznie wybiegają poza ramy tego artykułu i tu szczególnie polecam pozycję 2 z literatury. Autor po prostu genialnie tłumaczy działanie FFT. Oczywiście na początek należy zapoznać się ze standardowym DFT i jego własnościami,

co również zostało świetnie przedstawione w powyższej książce. Czyli zostawiamy analizę Fouriera w spokoju i przechodzimy do pętli głównej. Akwizycja sygnału przebiega identycznie jak w oscyloskopie, tyle tylko, że bez możliwości użycia drugiego kanału. Nie ma żadnej procedury wyzwalania. Zamiast tego wywołwana jest właśnie funkcja FFT. Zlogarytmowane widmo częstotliwościowe, które zwraca, po drobnej modyfikacji nadaje się do wyświetlenia na LCD. Ta modyfikacja to możliwość przesuwania widma w pionie i poziomie, gdyż całość nie mieści się na wyświetlaczu. Wzmocnienie sygnału oraz częstotliwość próbkowania wygląda tak samo jak w oscyloskopie.

**Analizator stanów logicznych.** W tym przypadku mamy do czynienia z odstępstwem od reguły. Sygnał nie jest odczytywany poprzez DMA. Niestety kontroler ten nie bardzo radzi sobie z odczytem danych z portu mikrokontrolera. Problemem jest wyzwalanie odczytu. Nie da się sterować częstotliwością próbkowania. Dlatego odbywa się to w pętli. Zanim jednak nastąpi zapisanie bufora próbkami, sprawdzane są warunki początkowe. Może to być stan niski lub wysoki na jakimś pinie, lub dowolny wektor na całym porcie. Albo zbrocze narastające lub opadające na wybranych pinach. Dzięki odpowiedniej konstrukcji portów mikrokontrolera, reakcja na zbocza może być realizowana poprzez przerwanie. A to bardzo upraszcza program i zwiększa szybkość reakcji. Starsze AVR-y nie miały takiej możliwości.

**Wobuloskop.** Jest to połączenie generatora i oscyloskopu. W prezentowanym urządzeniu służy wyłącznie do zdejmowania charakterystyk badanych układów. Do dyspozycji mamy 3 tryby. *Przemiatanie częstotliwości, impuls Diraca oraz szum biały.* W pierwszym z nich program wchodzi w złożoną pętlę, gdzie generowany jest sygnał o coraz wyższej częstotliwości. W tym czasie odczytywana jest wartość ADC. Aby ograniczyć szumy i zakłócenia, dla każdej częstotliwości odczyt wykonywany jest wielokrotnie, a następnie

wynik zostaje uśredniony. Drugi tryb polega na tym, że wygenerowany zostaje krótki impuls, a następnie uruchamiany jest ADC i odczytywana jest odpowiedź impulsowa. Trzeci tryb wygląda analogicznie do drugiego, z tym że zamiast krótkiego impulsu, generowany jest szum biały w trakcie trwania pomiaru.

**Multimetr.** Tutaj akwizycja sygnału również przebiega tak samo jak w analizatorze widma. Oprócz pętli, w których liczone są wartości: skuteczna, średnia oraz minimalna i maksymalna, mamy osobną funkcję obliczającą częstotliwość. Tam również znajduje się pętla, gdzie wyznaczany jest najpierw okres sygnału. Dalszą część programu stanowią funkcje wyświetlające dane na LCD oraz instrukcje warunkowe. Na podstawie uzyskanych wartości program automatycznie dobiera odpowiednią częstotliwość próbkowania i wzmacnienie sygnału.

W drugiej części artykułu zostanie opisany montaż, uruchomienie i kalibracja, a także wskazówki, dotyczące obsługi przyrządu.

Arkadiusz Hudzikowski  
hudzikowski@gmail.com

Komplet podzespołów z płytą jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2999.



**Profesjonalny nóż do zdejmowania izolacji z kabli**




Kod: HJCK01 **32,00 PLN**

- Model: 28H 10282
- Przeznaczony do kabli o śr.: 3-28mm
- Śruba do płynnej regulacji długości ostrza
- Solidna niemiecka konstrukcja (Made in Germany)

www.sklep.avt.pl handlowy@avt.pl tel: (22) 257 84 50