

Eksperymentalny Bezprzewodowy oscylloskop na systemie Android

część 1



Jedną z czynności najbardziej pożądaných, wręcz niezbędnych przy projektowaniu nowego urządzenia, jest zbadanie jego zachowania w rzeczywistości i zweryfikowanie, czy jego działanie odpowiada teoretycznym przewidywaniom. Nie zawsze pomiar za pomocą multimetru daje wystarczającą wiedzę na temat danego sygnału. Zwykle oprócz danych, dotyczących napięcia skutecznego czy średniej częstotliwości, potrzebna jest nam wiedza o zachowaniu się badanego sygnału w dziedzinie czasu. Można wtedy wykryć ewentualne przebiegi, zakłócenia czy niepoprawności kształtu sygnału skorelowane z osią czasu lub wobec innego sygnału z bardzo dużą dokładnością. Wszystkie te wymagania spełnia oscylloskop, przede wszystkim z uwagi na sposób prezentowania zmian badanego sygnału w czasie w postaci wykresu y(t).

Ze względu na zalety, oscylloskopy cieszą się ogromnym powodzeniem wśród profesjonalistów i amatorów. Oscylloskop jest podstawowym narzędziem w pracowni elektronika. Dziś dominują oscylloskopy cyfrowe, gdzie wejściowy sygnał analogowy jest przetwarzany na cyfrowy, a potem przetwarzany i zobrazowany na ekranie.

Niestety oscylloskopy są również jednymi z najdroższych narzędzi, a ich cena rośnie proporcjonalnie do pasma i szybkości próbkowania (na szczęście stale spadają ceny w przeliczeniu na 1 MSps). Bariera cenowa nawet najprostszých, tradycyjnych oscylloskopów, nadal jest dosyć wysoka, jak na kieszeń przeciętnego amatora. Najtańsze oscylloskopy jednokanałowe można kupić za kilkaset złotych. Natomiast jeśli poszukiwany jest *oscylloskop bezprzewodowy*, to cena rośnie drastycznie, nie zapewniając w zamian za to proporcjonalnego wzrostu parametrów. Dodatkowo takich rozwiązań jest mało na rynku. Właśnie z powyższych powodów zdecydowałem się na zaprojektowanie funkcjonalnego oscylloskopu o parametrach wystarczających do amatorskich rozwiązań, ale przede wszystkim będącego urządzeniem tanim i niekonwencjonalnym.

Założeniem mojego projektu było zbudowanie przenośnego oscylloskopu cyfrowego o jak najmniejszych gabarytach i o cenie konkurencyjnej w stosunku do urządzeń komercyjnych. Aby ograniczyć koszty, zrezygnowałem z wbudowanego wyświetlacza, na rzecz aplikacji napisanej dla systemu operacyjnego Android i pracującej w telefonie komórkowym z tym systemem. *Wyświetlaczem – ekranem jest telefon komórkowy*, a aplikacja stanowi interfejs użytkownika. *Właściwym oscylloskopem jest moduł, pracujący pod kontrolą mikroprocesora z rodziny ARM Cortex M3*. Komunikacja pomiędzy modułem próbkującym a aplikacją w systemie Android odbywa się w standardzie Bluetooth 2.1.

Dzięki wykorzystaniu transmisji bezprzewodowej jesteśmy w stanie wykonać pomiary w miejscach niedostępnych dla klasycznych

urządzeń. Wszędzie tam, gdzie utrudniony jest dostęp dla człowieka lub obserwacja może być niebezpieczna, np.: pod maską jadącego samochodu.

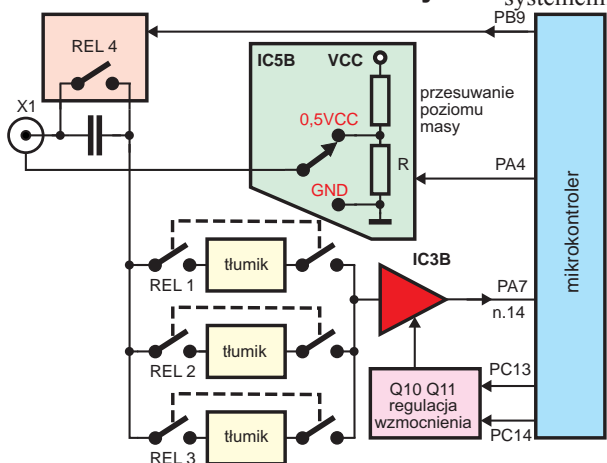
Dostępność na rynku urządzeń bezprzewodowych jest znikoma. Osobiście znalazłem jedynie dwóch producentów oferujących takie urządzenia. Są to specjalistyczne urządzenia do diagnostyki samochodowej w bardzo wygórowanych cenach, oscylujące wokół 10 000 złotych. Z tego właśnie powodu zdecydowałem się na realizację mojego projektu.

Opis układu – hardware

Schemat blokowy oscylloskopu – przystawki, pokazany jest na **rysunku 1**. Opis działania układu warto rozpocząć od prześledzenia drogi, jaką przebywa sygnał wejściowy podany na gniazdo BNC, oznaczone X1. Pierwszym blokiem jest obwód przesunięcia poziomu masy wejściowej, umożliwiający obserwację napięć ujemnych. Następny blok (w zależności od stanu przełącznika REL4) odejmuje składową stałą lub pozostawia sygnał bez zmian. Kolejne bloki stanowią włączane przełącznikami dzielniki wejściowe wraz ze wzmacniaczem wejściowym IC3B, mające na celu takie dostosowanie amplitudy sygnału, aby jak najlepiej wykorzystać zakres napięciowy przetwornika analogowo-cyfrowego. Dalej sygnał trafia do przetwornika AC procesora, gdzie jest próbkowany. Już w formie cyfrowej sygnał przesyłany jest poprzez Bluetooth do telefonu komórkowego, gdzie jest przetwarzany i gdzie następuje jego wizualizacja na ekranie. Pełny schemat ideowy oscylloskopu pokazany jest na **rysunku 2**. Kolor jasnoniebieski wyróżnia porty mikroprocesora, kolor żółty – przełączniki, a czerwony – główny wzmacniacz IC3B.

Z uwagi na zasilanie bateryjne, nieracjonalne byłoby zastosowanie klasycznych monostabilnych przełączników, wymagających ciągłego przepływu prądu przez

Rys. 1



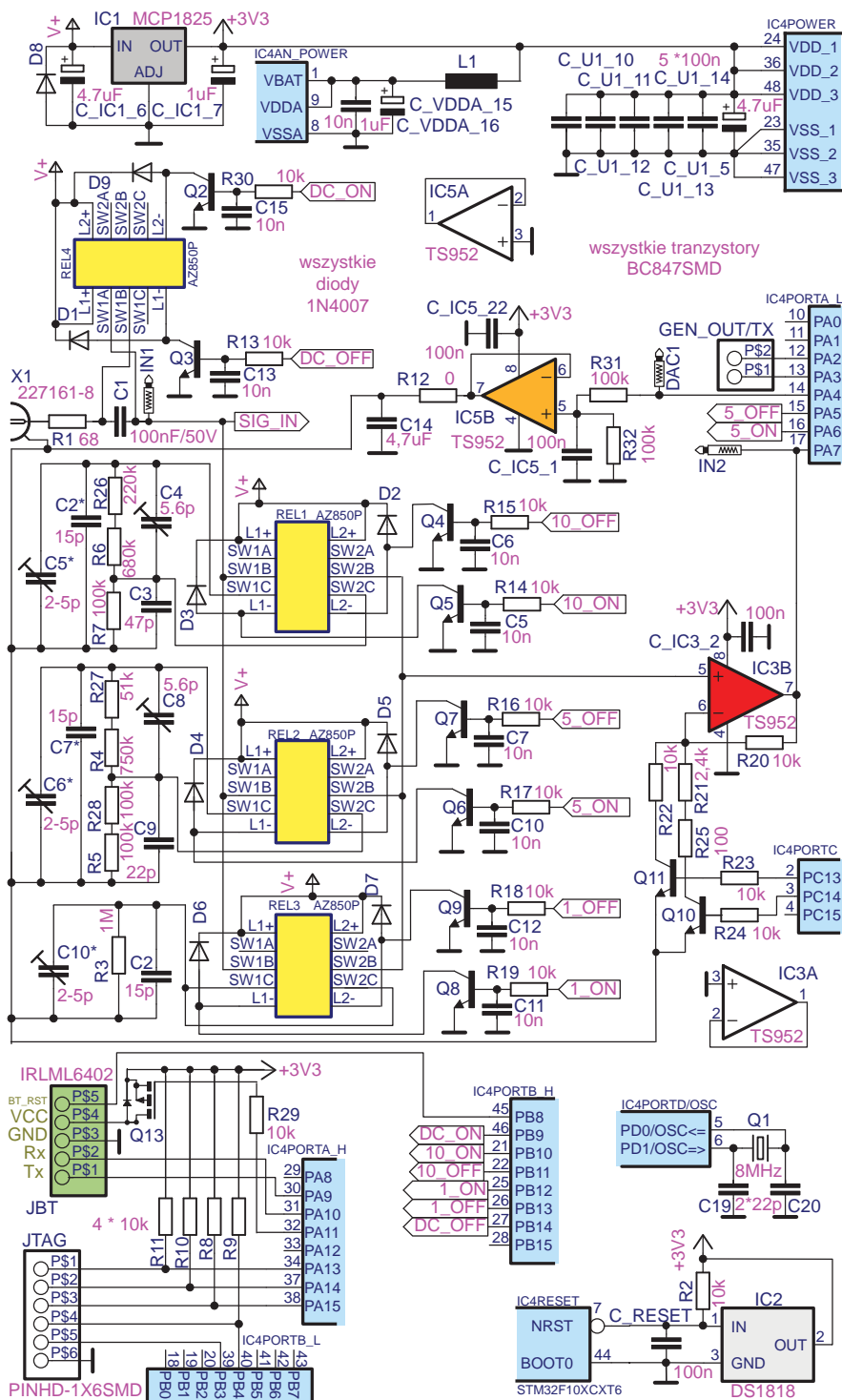
cewki. Niezbędne stało się zastosowanie droższych i trudniej dostępnych dwucewkowych przekaźników bistabilnych. Podanie impulsu o czasie co najmniej 2ms załącza lub rozłącza styki przekaźnika.

Obwód przesuwania poziomu masy wejściowej ma na celu przesunięcie poziomu przetwarzania (na połowę napięcia zasilania mikroprocesora). Dzięki temu możliwa jest obserwacja sygnałów ujemnych względem masy wejściowej. Jednak przy obserwacji przebiegów o polaryzacji dodatniej połowa zakresu przetwornika A/D jest niewykorzystana. W układzie przewidziano możliwość pełnego wykorzystania zakresu przetwarzania do dokładniejszego pomiaru sygnałów dodatnich – sygnał z mikroprocesora (PA4, nóżka 14) pozwala włączyć i wyłączyć przesuwanie poziomu masy.

Logiczny sygnał sterujący podawany jest na dzielnik R31, R32. Na wyjściu dzielnika wytwarzane jest napięcie 0V w przypadku stanu niskiego albo napięcie $V_{CC}/2$ w przypadku stanu wysokiego. Na wyjściu wtórnika IC5B pojawia się to samo napięcie, ale przy dużo większej wydajności prądowej. Podawane jest ono na masę gniazda BNC, będącą masą wejściową o regulowanym poziomie. Jest to zupełnie nietypowe rozwiązanie i zdaje egzamin tylko w przypadku, gdy wzmacniacz IC5B ma wyjście typu rail-to-rail z tranzystorami MOS na wyjściu. Dlatego zamiast planowanego wcześniej NE5532 pracuje tu TS952.

Obwód usuwania składowej stałej. Każdy oscyloskop ma przełącznik AC/DC, pozwalający usunąć składową stałą sygnału mierzonoego. W urządzeniu rolę tę odgrywa kondensator C1, który w trybie pomiaru DC jest zwierany przez styki przekaźnika REL4.

Blok dzielników napięcia. Na wejściu oscyloskopu niezbędne są dzielniki napięcia wejściowego. W układzie mamy trzy bloki o stopniu podziału 1, 5 i 10, załączane przekaźnikami. Jednocześnie pracuje tylko jeden z nich (przełączony jest tylko jeden przekaźnik). Dzielniki są zaprojektowane tak, aby mogły współpracować z typowymi sondami oscyloskopowymi. W tym celu rezystancja dzielnika musi wynosić dokładnie $1M\Omega$, a pojemność $20pF$. W celu osiągnięcia dużej precyzji, w profesjonalnych oscyloskopach szerokopasmowych dzielniki wejściowe wykonywane są na specjalnym podłożu ceramicznym, często razem ze wzmacniaczem. Minimalizuje to wpływ pojemności pasozytniczych, a laserowa korekcja daje dokładność rzędu setnych części procenta. W moim projekcie, z uwagi na cenę elementów, kompromisowo zastosowałem elementy SMD w obudowie 0805 o tolerancji

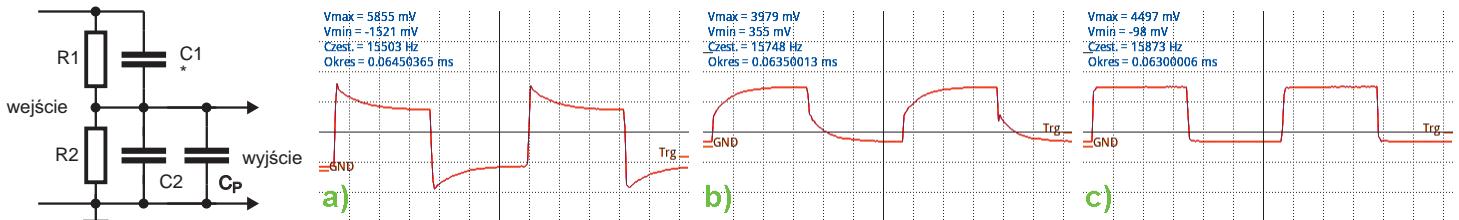


1%. Aby zachować wspomniany warunek i uzyskać potrzebny stopień podziału, byłem zmuszony łączyć rezystory szeregowo.

Trzeba też pamiętać, że dzielnik złożony z samych rezystorów nie jest dobrym rozwiązaniem, ponieważ dołączona do jego wyjścia pojemność wejściowa C_p wzmacniacza, rzędu kilkunastu pikofarów, znacząco ogranicza pasmo. Następuje usunięcie wyższych składowych oraz zmniejszenie maksymalnej szybkości narastania zbrocza. Zjawisko to eliminuje

Rys. 2

się poprzez kompensację dzielnika, czyli dołączenie dodatkowej pojemności oznaczonej C1 na rysunku 3. W praktyce zwykle potrzebny okazuje się też dodatkowy kondensator C2. C1 jest albo trymerem, albo połączeniem kondensatora stałego i trymera. Pojemności trzeba dobrać tak, by $R1 * C1 = R2 * (C2 + C_p)$. Wtedy tłumienie dzielnika jest jednakowe dla całego zakresu częstotliwości pracy.



Rys. 3 Rys. 4

Jak widać na rysunku 4a, gdy pojemność C1 jest zbyt duża, następuje zwiększenie wzmocnienia dla wysokich częstotliwości i występują przerosty w odpowiedzi impulsowej lub zwiększenie amplitudy w przypadku sygnału sinusoidalnego. Przy pojemności C1 zbyt małej, wyższe harmoniczne są tłumione, przez co zbrocza sygnału są łagodniejsze – rysunek 4b. W przypadku sygnału sinusoidalnego następuje zmniejszenie amplitudy wyższych składników sygnału. Prawidłowe ustawienie pojemności C1 daje rezultaty jak na rysunku 4c.

Do dolnej rezystancji dzielnika dołącza się zazwyczaj dodatkową pojemność widoczną na rysunku 3 jako C2. Bez niej należałoby w miejscu C1 stosować drogie i precyzyjne trymery o pojemności pojedynczych pikofaradów. Nie można jednak zwiększać pojemności C2 bez ograniczeń, bowiem szeregowe połączenie C1 i C2 wyznacza wypadkową pojemność wejściową dzielnika. Aby zapewnić prawidłową współpracę z zewnętrznymi sondami, całkowita wejściowa pojemność oscyloskopu musi wynosić 20pF. W celu osiągnięcia tej wartości zwykle dołącza się też dodatkowy trymer na wejściu dzielnika (C5, C6, C10 na rysunku 2).

Uwaga! W prezentowanym eksperymentalnym układzie nie przewidziano żadnych obwodów chroniących przed zbyt wysokim napięciem wejściowym. O maksymalnym napięciu, jakie można podłączyć do wejścia oscyloskopu bez ryzyka uszkodzenia, decyduje więc głównie stopień podziału dzielnika. Zastosowano trzy wejściowe dzielniki napięcia o stopniach podziału 1, 5 i 10 oraz wzmacniacz o wzmocnieniu 1, 2 i 5. W tabeli 1 przedstawiona jest korelacja pomiędzy tymi parametrami. Widoczne są dwie kolumny odnoszące się do napięcia wejściowego. Jedna dotyczy przypadku, w którym włączona jest polaryzacja masy wejściowej natomiast druga kolumna dotyczy przypadku, gdy ta polaryzacja jest wyłączona. W celu pomiaru większego napięcia należy zastosować odpowiednią sondę pomiarową, wyposażoną w dzielnik napięciowy o stopniu podziału większym od jednego. W wielu przypadkach taką sondę należy skompensować odpowiednio do pojemności wejścia oscyloskopu.

Wzmacniacz sygnału wejściowego. Z uwagi na to, że urządzenie jest zasilane

Zakres	max. napięcie wyświetlane [V]	aktywny dzielnik	wzmocnienie	Zakres max. napięcia wejściowego bez polaryzacji masy [V]	Zakres max. napięcia wejściowego z polaryzacją masy [V]
10 mV	0,1	1	5	0 ... 0,66	-0,33 ... +0,33
20 mV	0,2	1	5	0 ... 0,66	-0,33 ... +0,33
50 mV	0,5	1	5	0 ... 0,66	-0,33 ... +0,33
100 mV	1	1	5	0 ... 0,66	-0,33 ... +0,33
200 mV	2	1	2	0 ... 1,65	-0,825 ... +0,825
500 mV	5	1	1	0 ... 3,3	-1,65 ... +1,65
1 V	10	5	2	0 ... 8,25	-4,125 ... +4,125
2 V	20	5	1	0 ... 16,5	-8,25 ... +8,25
5 V	50	10	1	0 ... 33	-16,5 ... +16,5

z baterii, należało znaleźć układ o niewielkim poborze prądu. Wzmacniacz powinien być typu rail-to-rail, ponieważ musi przetwarzać sygnał wejściowy, którego amplituda może pokrywać się z amplitudą napięcia zasilającego. Uwzględniając cenę i dostępność układu w sklepach, zdecydowałem się na układ TS952. Sygnał słumiony w bloku dzielników trafia na wejście wzmacniacza operacyjnego IC3B, pracującego w układzie nieodwracającym. Jego wzmocnienie jest ustalone poprzez dzielniki rezystorowe (R20... R22, R25). Wzmocnienie jest tu ustawiane zupełnie nietypowo za pomocą tranzystorów bipolarnych Q10, Q11. Zasadniczo powinny to być odpowiednie tranzystory polowe, a nie bipolarne, ponieważ emiterzy tych tranzystorów dołączone są do masy wejściowej gniazda BNC, a zadaniem wzmacniacza jest wzmocnienie tylko sygnału wejściowego, a nie sumy sygnału wejściowego z napięciem polaryzacji masy wejściowej. Gdyby emiterzy zostały na stałe połączone do masy, to przy ustawionym wzmocnieniu 2 i 5 wyjście wzmacniacza osiągałoby stan nasycenia.

Mikroprocesor i przetwornik AC. Obecnie na rynku oferowanych jest wiele mniej lub bardziej nowoczesnych mikrokontrolerów różniących się ceną i możliwościami. Dokonując wyboru mikrokontrolera, postawiłem przede wszystkim na szybkość wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego oraz niski pobór prądu. Przetwornik analogowo-cyfrowy, wbudowany w mikroprocesor STM32F103C8, jest jednym z najszybszych przetworników, jakie można znaleźć w ogólnodostępnych mikroprocesorach, wyłączając produkty przeznaczone do DSP. Maksymalna częstotliwość taktowania wynosi 14MHz, co przy ustawionym minimalnym czasie próbkowania 1,5 cyklu i doliczeniu wymaganych 12,5 cykli niezbędnych do przetworzenia próbki pozwala na odczyt

Tabela 1

co 1 us kolejnych spróbkowanych wartości sygnału wejściowego. Ponadto mikroprocesor ten ma dwa niezależne moduły przetworników, które można ustawić w tryb Dual Mode, co umożliwia podwojenie maksymalnej częstotliwości próbkowania.

W trybie Dual Mode pierwszy startuje przetwornik ADC1, a dopiero po 7 cyklach zegarowych, stanowiących połowę okresu przetwarzania, zostaje uruchomiony przetwornik ADC2. Wyniki konwersji z obydwu przetworników zostają zapisane do jednego 32-bitowego rejestru, przy czym przetwornik ADC1 zajmuje bity [11:0], natomiast przetwornik ADC2 zajmuje bity [27:16].

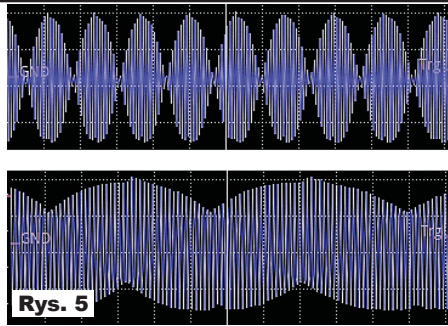
W komercyjnych rozwiązaniach, w celu osiągnięcia o wiele większych częstotliwości próbkowania, stosuje się zewnętrzne przetworniki analogowo-cyfrowe, sterowane poprzez szybkie układy FPGA. Odpowiednio zaprogramowany układ FPGA steruje akwizycją przetwornika oraz pełni funkcję sterownika zewnętrznej pamięci. Po zakończeniu próbkowania mikroprocesor może już w swoim tempie odczytać dane z pamięci zewnętrznej i je przetworzyć.

Pasma i częstotliwość próbkowania. Możliwie szerokie pasmo przenoszenia obwodów wejściowych oscyloskopu jest niezwykle ważne przy obserwacji przebiegów niesinusoidalnych, które składają się z wielu harmonicznnych. Obciążenie tych harmonicznnych poprzez obwód wejściowy o zbyt małej częstotliwości granicznej powoduje filtrację, widoczną jako zaokrąglenie, rozmycie lub zupełne zniknięcie szybkozmennych fragmentów przebiegu np. zbroczy lub krótkich szpilek.

Wraz ze zwiększaniem wartości podstawy czasu, zmniejszana jest szybkość próbkowania. Jednak zbyt mała częstotliwość próbkowania w stosunku do częstotliwości

przebiegu próbkowanego objawia się zjawiskiem tzw. aliasingu. Jest to obserwacja częstotliwości pozornie wielokrotnie mniejszej od rzeczywistej częstotliwości mierzonego sygnału. Dwa przykłady źle spróbkowanego sygnału przedstawia **rysunek 5**. Aby zapobiegać aliasingowi, stosuje się filtry dolnoprzepustowe, które wycinają częstotliwości wyższe od połowy częstotliwości próbkowania. W tym projekcie nie zdecydowano się na użycie takiego filtra, ponieważ skomplikowałoby to układ lub zmusiłoby do zastosowania filtrów cyfrowych, które bardzo obciążałyby procesor. W tym przypadku założono, iż użytkownik ma świadomość, jakiego rzędu jest częstotliwość mierzonego sygnału. W przypadku wątpliwości bezpieczniejszym jest zacząć analizę od ustawienia szybkiej (krótkiej) podstawy czasu i sukcesywnie ją zwiększać do uzyskania zadowalającego wycinka przebiegu na ekranie.

Wniosek z tego jest prosty, najlepiej próbkować z jak największą częstotliwością. Jednak co zrobić, gdy nasz przetwornik nie oferuje takiej szybkości działania, jaką byśmy sobie życzyli? Nie trzeba od razu kupować droższego modelu, ponieważ producenci oscyloskopów radzą sobie z tym problemem, wykorzystując technikę próbkowania w czasie ekwiwalentnym. Pozwala ona na kilkakrotne zwiększenie częstotliwości próbkowania bez zwiększania szybkości pracy przetwornika analogowo-cyfrowego. Metoda ta polega na zbieraniu próbek w kilku wyzwoleniach, o różnym czasie opóźnienia względem punktu wyzwolenia. Dzięki temu jeden okres przebiegu składany jest z kilku innych następujących po sobie. Warunkiem pracy w tym trybie jest to, aby badany przebieg był powtarzalny. Z konstrukcyjnego punktu widzenia, aby wykorzystać taki tryb, należy zaprojektować bardzo dokładny układ wyzwalań, aby wyzwolenie za każdym razem zachodziło w tym samym punkcie przebiegu. Niespełnienie tego warunku skutkowałoby rozmyciem przebiegu, dlatego w niniej-



Rys. 5 Dwa przykłady źle spróbkowanego sygnału. Górny wykres przedstawia sygnał z aliasingiem, gdzie częstotliwość pozornie jest niższa niż rzeczywista. Dolny wykres przedstawia sygnał z aliasingiem, gdzie częstotliwość pozornie jest wyższa niż rzeczywista.

szym projekcie zrezygnowano z tej funkcjonalności. Relację pomiędzy wybraną podstawą czasu a częstotliwością próbkowania przedstawia **tabela 2**.

Długość rekordu akwizycji wskazuje, ile próbek sygnału wejściowego może zapamiętać oscyloskop. Długi rekord pozwala na zarejestrowanie dużej liczby próbek, pokrywających długi czas. Dzięki temu użytkownik może swobodnie przewijać zapamiętany przebieg na ekranie w poszukiwaniu interesującego fragmentu. Niestety wydłużenie rekordu akwizycji niesie ze sobą również wydłużenie czasu przetwarzania danych, co jest niepożądane, ponieważ zmniejsza częstotliwość odświeżania treści obrazu. W przypadku prostych konstrukcji, gdzie wszystkie operacje wykonywane są w jednym procesie, może dojść do opóźnienia reakcji urządzenia podczas zmiany parametrów przez użytkownika. W niniejszym projekcie ten problem nie występuje, ponieważ aplikacja pracująca pod systemem Android uruchamia wiele wątków do różnych operacji. Problem pozostaje jedynie przy beczynnym oczekiwaniu urządzenia próbkującego na wysłanie długiego rekordu poprzez wolny interfejs komunikacyjny. Dopiero po otrzymaniu odpowiedzi zwrotnej o odebraniu danych może rozpocząć kolejny cykl próbkowania.

Ze względu na powyższe problemy, przy stosowaniu długiej pamięci próbek, w omawianym projekcie zdecydowano się powierzyć użytkownikowi ustawienie długości pamięci. Za pomocą panelu preferencji, w aplikacji pracującej na telefonie, użytkownik może określić, ile próbek będzie zbieranych w jednym cyklu próbkowania. Ustawienia są oddzielne dla trybu triggera (wyzwalania) pojedynczego oraz dla triggera (wyzwalania) automatycznego. Podział ten zastosowano z tego względu, że długa pamięć jest szczególnie użyteczna przy obserwacji jednorazowych, niepowtarzalnych przebiegów, natomiast pamięć krótka jest przydatna do obserwacji przebiegów okresowych, gdzie potrzebna jest szybka reakcja na zmianę sygnału wejściowego. Wartością graniczną jest liczba 4000 próbek. Wynika ona z wielkości pamięci RAM zastosowanego mikroprocesora. Długość rekordu akwizycji wpływa na liczbę przebiegów rejestrowanych w ciągu sekundy.

Dla zwykłego użytkownika, parametr ten objawia się w praktyce jako częstotliwość odświeżania treści przebiegu na wyświetlaczu. Zbyt mała częstotliwość sprawia wrażenie powolnego działania urządzenia, ponieważ w wyniku zmiany kształtu sygnału wejściowego użytkownik dostrzeże zmianę na wyświetlaczu po czasie na tyle długim, że widać brak płynności zmiany sygnału. Z kolei duża liczba przebiegów rejestrowanych w ciągu sekundy objawia się jako natychmiastowa zmiana kształtu sygnału na ekranie w wyniku zmiany sygnału na wejściu przrządu. Najlepiej jest, gdy parametr ten przekracza granicę percepcji ludzkiego oka, zatem gdy jest większy od 25Hz. W projekcie nie udało się osiągnąć tak dużej wartości, ze względu na bardzo niską prędkość transmisji modułu komunikacyjnego. Niemniej przy odpowiednich ustawieniach można osiągać zadowalającą szybkość odświeżania przebiegu, a tym samym komfort użytkownika.

W omawianym oscyloskopie transmisja danych może odbywać się w dwóch trybach: z potwierdzeniem lub bez. Tryb z potwierdzeniem polega na odesłaniu przez aplikację wartości 1 po odebraniu wszystkich danych. Stanowi to zezwolenie dla urządzenia próbkującego do rozpoczęcia kolejnego cyklu próbkowania. Zaletą tego rozwiązania jest pełna kontrola nad procesem wysyłania oraz oszczędzanie energii w czasie, gdy użytkownik postanowi zamrozić przebieg celem jego dokładniejszej analizy. Wtedy wysyłanie również zostaje zatrzymane, oszczędzając energię. Wadą jest to, że na wysłanie jednego bajtu danych moduł Bluetooth potrzebuje dużo czasu, ponieważ czeka na wypełnienie bufora lub na upływanie pewnego czasu.

Drugi tryb pracy to transmisja z ustawionym opóźnieniem. Transmisja w tym trybie nie korzysta z żadnego sygnału zwrotnego, zakładając, iż w eksperymencie dobranym i ustawionym czasie oba moduły, nadawczy i odbiorczy, zdążą sobie przekazać dane, a aplikacja zdąży je przetworzyć. Moduł próbkujący, po wysłaniu pakietu danych, wchodzi w pętlę opóźniająca o regulowanym czasie opóźnienia i dopiero po jej opuszczeniu przechodzi do etapu zbierania kolejnych próbek sygnału wejściowego. Zmiany wartości opóźnienia dokonuje się w panelu preferencji w aplikacji. Należy w odpowiednim polu wpisać wartość opóźnienia w milisekundach. Wpisanie wartości zero oznacza przełączenie do trybu transmisji z potwierdzeniem. Wadą transmisji w trybie opóźnienia jest to, iż moduł próbkujący wysyła dane w sposób ciągły, bez żadnej kontroli, nawet kiedy użytkownik tych danych nie potrzebuje, gdyż zdecydował się na zatrzymanie

Tabela 2

Podstawa czasu [us]	Czas próbkowania [us]	Okres czasu pełnej pamięci [ms]
1	0,5	2
2	0,5	2
5	0,5	2
10	0,5	2
20	1	4
50	1,87	7,48
100	3,85	15,4
200	18	72
500	18	72
1000	36	144
2000	72	288
5000	180	720
10000	360	1440
20000	720	2880
50000	1800	7200

przebiegu. Wpływa to znacząco na zużycie energii w oscyloskopie. Kolejną wadą jest brak stabilności czasu, w jakim wysyłane są kolejne pakiety danych. Dotyczy to ustawień mniejszych od 20 milisekund, kiedy to następuje chwilowe zawieszanie transmisji, ponieważ moduł nadawczy nie nadaje z wysyłaniem pakietu poprzedniego. Według przeprowadzonych pomiarów, przy wielkości bufora 300 próbek, udało się uzyskać maksymalnie 16,3fps w trybie transmisji z opóźnieniem 20ms oraz 13,4fps w trybie transmisji z potwierdzeniem.

Blok wyzwalania. Poprawne zaprojektowanie bloku wyzwalania jest jednym z najtrudniejszych zadań, jakie stoją przed konstruktorem oscyloskopu. Silne zaszumienie sygnału, mała dokładność lub brak powtarzalności punktu wyzwalania powodują, że przebieg na ekranie będzie niestabilny, bowiem każde kolejne rysowanie przebiegu zaczynać się będzie od innego punktu. Przy dużej liczbie rejestrowanych przebiegów na sekundę obraz będzie rozmazany, a przy mniejszej liczbie obraz będzie drgał. Pierwsze oscyloskopy, ze względu na ograniczenia techniczne i prostotę konstrukcji, były pozbawione tego jakże ważnego modułu. Z problemem stabilności obrazu radzono sobie poprzez synchronizację podstawy czasu z okresowym przebiegiem badanym. Wraz z postępem techniki oscyloskopowej i wprowadzeniem do niej elektroniki cyfrowej rosła złożoność oferowanych trybów wyzwalania stosowanych w oscyloskopach.

W oscyloskopach analogowych do wyzwalania stosowano komparator napięcia, który porównywał wartość napięcia badanego z zadaniem poziomem wyzwalania. Wytworzony impuls był następnie kształtowany poprzez obwód z histerezą, najczęściej w postaci bramki z przerzutnikiem Schmitta. W oscyloskopach cyfrowych różnorodność trybów wyzwoleń jest dużo większa, pozwala na wyzwalanie chociażby poprzez szerokość impulsu, impulsem niepełnym, impulsem szpilkowym, szybkością narastania. Im więcej trybów wyzwalania oferuje oscyloskop, tym większy ma udział w tym zadaniu część cyfrowa.

W tym projekcie, ze względu na łatwość wprowadzania zmian, zerowe nakłady finansowe i znacząco mniejsze nakłady czasu projektowania, zdecydowano się na stworzenie bloku wyzwalania jedynie na drodze cyfrowej. Zastosowano dwa bloki wyzwalania, ponieważ przebiegi o odmiennych kształtach wymagają odmiennych metod analizy. Blok pierwszy przystosowany jest do wykrywania szybko narastających zbo-

czy przebiegów prostokątnych, natomiast blok drugi do wyzwalania przebiegiem ciągłym. W celu polepszenia stabilności punktu wyzwolenia aplikacja w bloku rysowania wykresu szuka ponownie punktu wyzwolenia, dysponując wszystkimi próbkami sygnału. Daje to dużo większą dokładność, ponieważ w urządzeniu próbującym do dyspozycji było jedynie kilka próbek i wykrywanie następowało w czasie rzeczywistym.

Kontroler DMA (Direct Memory Access) pozwala na przesyłanie danych pomiędzy pamięcią i peryferiami bez udziału procesora. Jest to bardzo użyteczny moduł, gdyż pozwala na zdjęcie z rżenia obowiązku prostego adresowania kolejnych komórek pamięci przy przesyłaniu dużej ilości danych. Dzięki temu procesor może zająć się innymi operacjami. W przypadku braku układu DMA, system utraciłby responsywność, a użytkownik mógłby stwierdzić, że się zawiesił. Konfiguracja DMA wymaga jedynie podania adresu źródłowego, adresu docelowego, włączenia lub wyłączenia inkrementacji adresu źródłowego i docelowego, określenia długości porcji danych oraz całkowitej liczby przesyłanych danych.

Moduł komunikacyjny. Były dwie możliwości wyboru standardu, w jakim miała się odbywać komunikacja bezprzewodowa pomiędzy modułami. Pierwsza to komunikacja z wykorzystaniem modułu WiFi, druga to wykorzystanie modułu Bluetooth. Na korzyść WiFi przemawia bezsprzecznie jego większa przepustowość i możliwość łatwego podłączenia większej liczby urządzeń. Niestety jest to okupione dużo większym poborem energii, co przy urządzeniu zasilanym bateryjnie przyczyniłoby się do szybkiego rozładowania źródła zasilania. Moduły WiFi nie są również tak bardzo rozpowszechnione na rynku elementów elektronicznych, jak ma to miejsce w przypadku modułów Bluetooth.

Z względu na powyżej opisane zalety, do komunikacji pomiędzy urządzeniem próbującym a urządzeniem wyświetlającym wykorzystano moduł BTM-222, pracujący w standardzie Bluetooth w wersji 2.1 i klasie 1, co pozwala na transfer danych z prędkością sięgającą, według specyfikacji, 2,1Mbps na dystansie do 100 metrów. Moduł ten został wybrany przede wszystkim ze względu na prosty



interfejs, po którym następuje komunikacja lokalna. Jest to RS-232, dla którego w tym module można ustawić maksymalną prędkość sięgającą 460,8kbps, co zresztą jest dosyć dużą wadą, gdyż nie pozwala na wykorzystanie pełnych możliwości jakie daje standard Bluetooth 2.1. Niewątpliwą zaletą tego modułu jest to, że w trybie pracy jako *slave* nie jest wymagane wysyłanie jakichkolwiek komend. Po zestawieniu połączenia przez urządzenie nadrzędne moduł staje się przezroczysty, dzięki czemu dane wysyłane do modułu lokalnego pojawiają się na wyjściu modułu zdalnego.

Szybkość transferu. W celu sprawdzenia jakości transmisji wykonano kilka pomiarów przy wysyłaniu paczek danych o różnej wielkości. Ich analiza doprowadziła do następujących wniosków: czas przesyłania 100 i 500 bajtów jest praktycznie taki sam, ponieważ dane, przesyłane przez najniższą warstwę Bluetooth, przesyłane są pakietami. Moduł czeka, aż otrzyma wystarczającą ilość danych lub do upłynięcia pewnego czasu, i dopiero wtedy wysyła cały pakiet. Wpływa to znacznie na średnią prędkość transferu oraz na dużą wartość opóźnień.

Maksymalna liczba bajtów, jaką udało mi się wysłać w jednej paczce, to 5000. Przy próbie wysłania większej liczby za jednym razem transmisja blokuje się na mniej więcej 2000 bajcie. Prawdopodobnie moduł nie nadaje z wysyłaniem danych i przepełnia się bufor wejściowy.

Moduł według specyfikacji powinien osiągać 2,1Mbps. W zaprezentowanej konfiguracji ograniczeniem powinna być prędkość UART-u, sięgająca 460,8kbps. Niestety maksymalna, realnie osiągnięta prędkość waha się na poziomie 120kbps przy wysyłaniu dużych pakietów danych.

Dokończenie artykułu za miesiąc.

Paweł Domagański
domagalski250@gmail.com

