

Symulacja i pomiar czyli LTspice i Analog Discovery 2 w rękach konstruktora (8)

Model namiernika celu lotnictwa RAF

W tym odcinku zajmiemy się tematem nawiązującym do historii II Wojny Światowej. Będzie mowa o jednej z metod naprowadzania bombowców RAF na cele znajdujące się na terytorium Niemiec stosowanej w nalotach dywanowych w latach 1942 do 1945. Nie zbudujemy oczywiście całego systemu, spróbujemy natomiast wczuć się w rolę nawigatora obsługującego urządzenie końcowe.

Dziś, w epoce galopującego postępu elektroniki nie zdajemy sobie sprawy z tego, jak pomysły urządzenia stosowano już podczas II Wojny Światowej. Każda wojna, poza wszystkimi okrucieństwami jakie ze sobą niesie, jest potężnym stimulatorem rozwoju niemal każdej dziedziny nauki i przemysłu. Nas najbardziej interesuje elektronika, zbudujemy więc wirtualny i rzeczywisty model radio-namiernika – urządzenia montowanego w każdym Lancasterze, prawdopodobnie też w Stirlingach czy Halifaxach. Nasza konstrukcja

jest oparta na współczesnych elementach elektronicznych, nie jest to wierna replika urządzenia oryginalnego, a jedynie model i to wykonany według autorskiej wizji tego urządzenia. Tak czy inaczej eksperymenty pozwolą przynajmniej częściowo wczuć się w rolę nawigatora historycznego samolotu bombowego.

Odrobina historii

Zanim zaczniemy budowę modelu radionamiernika warto zapoznać się z wydarzeniami, które decydowały o jego powstaniu. Tematyka jest bardzo fascynująca, zachęcam Czytelników do sięgnięcia do źródeł.

Rozpoczęta w roku 1939 wojna szybko ogarnęła całą Europę. Od września 1940 roku lotnictwo Luftwaffe regularnie bombardowało cele położone na terenie Wielkiej Brytanii, co nie pozostawało bez odpowiedzi ze strony RAF (Royal Air Force). Operacje prowadzone zarówno przez Luftwaffe, jak i RAF charakteryzowały się wyjątkowym okrucieństwem. Obydwie strony stosowały taktykę niszczenia obiektów cywilnych, co miało prowadzić do obniżania morale społeczeństwa, a w konsekwencji szybkiego poddania się.

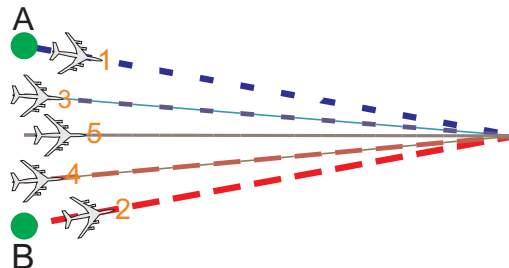
Pierwsze naloty RAF-u przebiegały bardzo chaotycznie, w zasadzie bez większej strategii. Siły uderzeniowe były rozrzucone na dużej przestrzeni, co ułatwiało zadanie naziemnej obronie przeciwlotniczej oraz myśliwcom, dla których pojedyncze bombowce były łatwym celem. Duże straty czyniły niemieckie myśliwce nocne, których zadaniem było patrolowanie terytorium Niemiec i ochrona przed atakami prowadzonymi w ciemności. W miarę upływu czasu udoskonalano taktykę, do uzbrojenia wchodziły bombowce wyposażane w lepsze urządzenia nawigacyjne i celownicze. Korzystano ze specjalnych eskadr realizujących pozorowane ataki mylące obronę przeciwlotniczą. Wyposażenie samolotów Luftwaffe w radary powodowało dalszą komplikację operacji i konieczność wprowadzania odpowiednich środków zaradczych. Były nimi m.in. metalizowane taśmy (tzw. *window*) zrzucane w razie zagrożenia, które dość skutecznie zakłócające odczyty radarów.

Jednym z większych wyzwań było opracowanie metody naprowadzania bombowców na cel. Pamiętajmy, że nie było w tych czasach pocisków kierowanych. Samolot musiał bardzo precyzyjnie nadlecieć nad cel i z zegarmistrzowską precyzją wypuścić bombę z łuku. Celowniczy uwzględniał kurs samolotu, jego wysokość i prędkość. Konieczne były również odpowiednie korekty na wiatr. Terminy nalotów dobierano z uwzględnieniem prognoz pogody, tak aby cele były rozpoznawalne nawet w nocy. Obrona stosowała jednak często zasłony dymne.

Aby zapewnić jak największą dokładność naprowadzania bombowców nalot składał się z kilku eskadr realizujących odrębne zadania. Oprócz wspomnianych już samolotów pozorujących duże znaczenie miały tzw. *pathfindery* – samoloty wstępnie znakujące cele za pomocą zrzucanych flar o uzgodnionej kolorystyce. Po nich nadlatywały samoloty *supporters*, których zadaniem była likwidacja ewentualnych stanowisk obrony p.lot. Wykorzystywały do tego celu bomby burzące. Ostateczną ścieżkę do lotu wyznaczały żółte markery wypuszczane przez skrajne bombowce szyku. Coraz większym wsparciem była elektronika, i tu dochodzimy do sedna.

Radionamiernik RAF

Wyobraźmy sobie system naprowadzania, w skład którego wchodzi dwie oddalone od siebie o pewną odległość stacje nadawcze A i B emitujące kierunkowe wiązki. Częstotliwości nośne tych stacji są modulowane sygnałem dźwiękowym przypominającym nieco znaki telegrafu Morse'a. Nadajnik A emituje kropki, a nadajnik B kreski. Stacje są ze sobą zsynchronizowane tak, że w przerwach między dwiema sąsiednimi kropkami mieści się dokładnie jedna kreska.



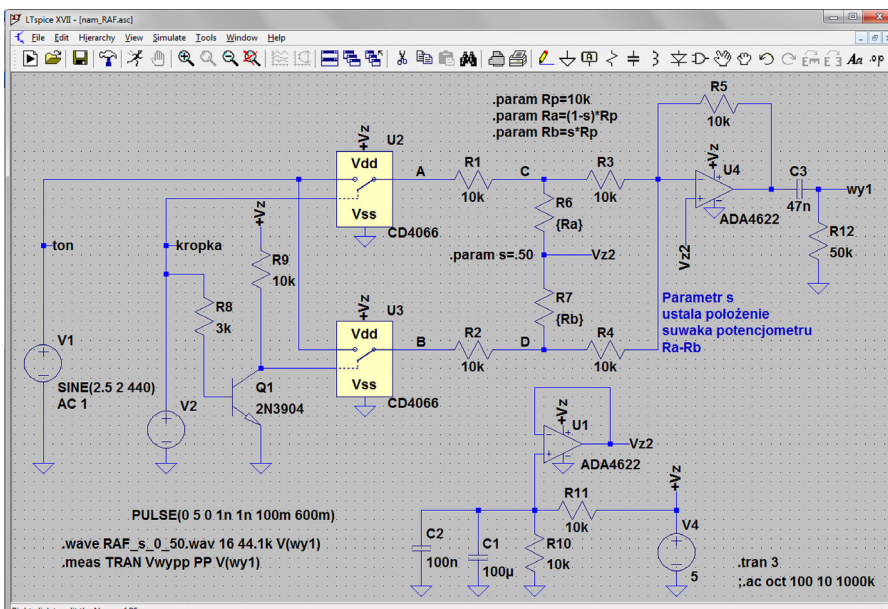
Rysunek 1. Ilustracja zasady działania radionamiernika

Emisja przebiega w sposób ciągły, bez żadnych przerw. Anteny obu nadajników są nakierowane na cel. Nawigator odbiera oba sygnały jednocześnie za pomocą zainstalowanego w samolocie urządzenia. Słyszany przez niego sygnał dźwiękowy zależy od kursu jakim leci samolot. Nawigator samolotu 1 (rysunek 1) będzie słyszał tylko kropki, nawigator samolotu 2 usłyszy tylko kreski. Nawigatorzy samolotów 3 i 4 będą słyszeć zarówno kreski, jak i kropki, przy czym w samolocie 3. głośniejsze będą kropki, a w samolocie 4. kreski. Nawigatorzy tych samolotów muszą informować pilotów o konieczności korekty kursu. Samoloty 1. i 3. muszą odbić w prawo, a samoloty 2. i 4. w lewo. Tylko samolot nr 5 leci dokładnie na cel. Jego nawigator słyszy w słuchawkach ciągle ton. Zakładając, że bombowce lecą dobrym kursem, pozostaje jeszcze ustalenie sposobu informowania załogi o momencie zrzutu bomb. Jest to jednak odrębny problem, którym nie będziemy się zajmować.

Projekt

Do budowy modelu radionamiernika stosujemy popularne klucze analogowe CD4066 oraz wzmacniacz operacyjny AD4622. Ciągły sygnał akustyczny o częstotliwości 440 Hz jest generowany w pierwszym kanale generatora arbitralnego Analog Discovery 2. Kanał drugi wykorzystamy do generowania przebiegu kluczującego ustalającego czasy trwania kropek i kresek. Jest jednak pewien problem: zestaw AD2 zawiera tylko generator dwukanałowy, a potrzebne są trzy sygnały. Na szczęście kluczowanie np. kresek można zrealizować przez zanegowanie impulsów kluczujących kropki. Wykorzystamy do tego tranzystor NPN typu 2N3904 (Q1).

Do zasilania stosujemy pojedyncze napięcie 5 V z zasilacza napięcia dodatniego AD2. Konieczne w związku z tym będzie wytworzenie sztucznej masy na poziomie połowy napięcia zasilającego. Napięcie to wyznaczają rezystory dzielnika R10, R11 (rysunek 2), a bufor wykonany na układzie U1 (AD4622) zapewnia małą impedancję sztucznej masy (Vz2).



Rysunek 2. Schemat modelu radionamiernika RAF narysowany w symulatorze LTSpice

Sygnal akustyczny – sinusoida o amplitudzie 2 V jest generowany przez źródło V1. Należy zapewnić składową stałą równą połowie napięcia zasilającego (2,5 V). Sygnal ten jest podawany na dwa klucze CD4066 (U2 i U3) włączane naprzemiennie za pośrednictwem źródła impulsów sterujących V2 i inwertera Q1. W symulatorze wykorzystujemy do tego źródło Voltage z opcją PULSE. Przyjmujemy parametry: PULSE(0 5 0 1n 1n 100m 600m), co oznacza: napięcie początkowe 0 V, napięcie w stanie włączenia 5 V, czas zwłoki 0, czas narastania i opadania 1 ns, czas trwania impulsu 100 ms, okres powtarzania 600 ms. Znak „kropki” trwa więc 100 ms, a „kreski” 500 ms. „Kropka” pojawia się na wyjściu klucza U2 (punkt A), „kreska” zaś na wyjściu klucza U3 (punkt B).

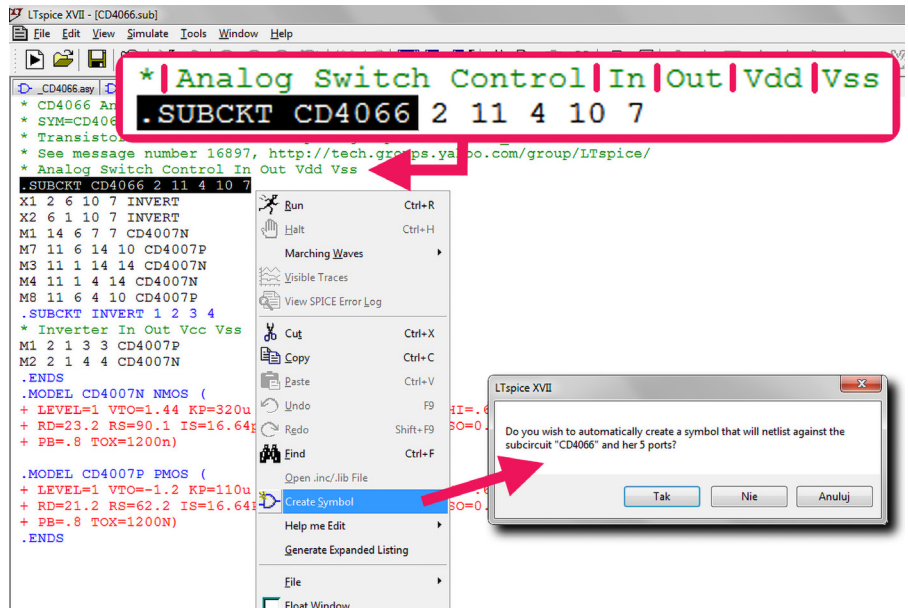
Sygnaly są balansowane za pomocą elementów R1, R2, i potencjometru złożonego z rezystorów R6 i R7. Rezystancje R6 i R7 są zadane parametrycznie, gdyż muszą pozostawać w ścisłej zależności wynikającej z ustawienia wirtualnego suwaka potencjometru. Rezystor R6 ma oporność: $R_a = (1-s) \cdot R_p$, gdzie parametr s określa położenie suwaka potencjometru (s może być większe od 0 i mniejsze od 1), a R_p to rezystancja całkowita potencjometru – przyjmujemy 10 kΩ. Rezystor R7 ma rezystancję: $R_b = s \cdot R_p$. Zmieniając położenie suwaka, zmieniamy stosunek amplitud sygnałów „kropki” i „kreski”. Znaki te są następnie sumowane w układzie z elementami U4, R3, R4 i R5. Aby można było odsłuchać sygnał generowany podczas symulacji, konieczne jest odcięcie składowej stałej występującej w sygnale wyjściowym. Zapewnia to kondensator C3. Rezystor R12 stanowi obciążenie układu.

Zmieniając położenie suwaka potencjometru symulujemy odejście z kursu naszego wirtualnego bombowca. W słuchawkach będą wówczas słyszane „kropki” i „kreski” w proporcjach zależnych od położenia suwaka. Tylko w środkowym położeniu usłyszymy jeden ciągły ton. Dla załogi bombowca oznacza to lot dokładnie w kierunku celu.

Brakujący element w bibliotece

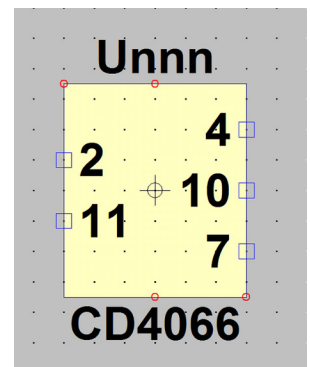
Wszystko byłoby ładnie, gdyby nie to, że w standardowej bibliotece LTspice nie ma elementu CD4066, musimy go więc jakoś dołączyć do zestawu. Znalezienie modelu LTspice często nie jest łatwe. Zwykle poszukiwania prowadzimy na stronach internetowych producentów, ale nie zawsze znajdziemy odpowiednie pliki. Ja znalazłem bibliotekę zawierającą modele wielu układów rodziny CD4000, do której prowadzi link <http://zpostbox.ru/CD4000.zip>. Zawartość należy skopiować na dysk i rozpakować plik CD4066.sub. Ważne jest określenie folderu, do którego trafi rozpakowany plik. Może to być folder, w którym są przechowywane standardowe elementy biblioteczne programu LTspice (C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\lib\sym), a jeśli nie chcemy mieszać oryginalnych plików z dołączanymi, plik CD4066.sub można zapisać w dowolnym innym folderze, do którego jednak trzeba będzie później podać ścieżkę dostępu.

Do użycia klucza CD4066 konieczne jest jeszcze zdefiniowanie jego symbolu graficznego wstawianego do schematu. Najwygodniejszą metodą jest skorzystanie z możliwości automatycznego utworzenia symbolu. W tym celu otwieramy w edytorze LTspice plik CD4066.sub, np. przeciągając go z menedżera plików do okna programu LTspice (rysunek 3), ustawiamy kursor na pierwszej linii pod komentarzem zawierającej frazę: .SUBCKT CD4066 i klikamy prawym przyciskiem myszki. Pojawia się menu, z którego należy wybrać polecenie Create Symbol. Program żąda jeszcze od nas potwierdzenia automatycznego wygenerowania symbolu klucza CD4066, na co oczywiście wyrażamy zgodę. Proponowany symbol ukazuje się na ekranie (rysunek 4). Można go zaakceptować bez zmian lub poddać edycji według własnych upodobań.

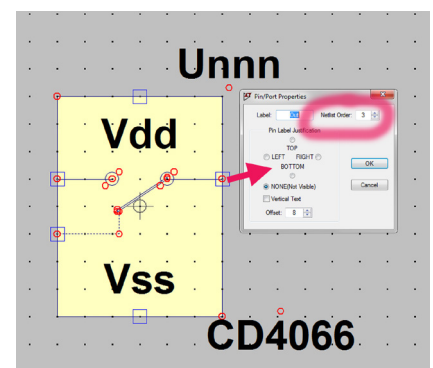


Rysunek 3. Automatyczne tworzenie symbolu na podstawie danych zawartych w pliku CD4066.sub

Praktycy zauważają, że w znalezionej bibliotece jest błąd w przyporządkowaniu wyprowadzeń do funkcji układu CD4066, co do celów symulacji nie ma znaczenia. Aby jednak nie wprowadzać w błąd Czytelników, którzy nie zaznajamiając się z artykułem od razu spróbują użyć elementu do symulacji, zmienimy nieco wygląd symbolu klucza. Wprowadzimy dodatkowe elementy graficzne, które jednoznacznie będą objaśniały funkcje poszczególnych wyprowadzeń. Nowy symbol pokazano na rysunku 5. Oznaczenia liczbowe widoczne w symbolu z rysunku 4 są jedynie etykietami i nie biorą udziału w tworzeniu listy połączeń tworzonego schematu. Istotne są natomiast numery porządkowe przypisane do poszczególnych pinów. Edycję tych parametrów przeprowadza się po kliknięciu prawym przyciskiem myszki na żądanym wyprowadzeniu, w wyniku czego zostaje wyświetlone okno właściwości (rysunek 5). Za pomocą dostępnych narzędzi edycyjnych (linia, elipsa, prostokąt, kopiowanie, przesuwanie, rozciąganie itd.) modyfikujemy symbol zgodnie z rysunkiem. Położenie poszczególnych wyprowadzeń układu zależy zwykle od pełnionych przez nie funkcji - wejścia najczęściej są umieszczane z lewej strony, wyjścia z prawej, zasilanie od góry, masa od dołu. Numery porządkowe wynikają z danych zawartych w pliku CD4066.sub. Odczytujemy z niego, że: wejście sterujące kluczem (Analog Switch Control) ma numer 1, wejście – 2, wyjście – 3, zasilanie Vdd – 4, masa Vss – 5 (rysunek 3). Funkcje wyprowadzeń podano w komentarzu nad definicją. W przypadku klucza oznaczanie pinu jako wejście lub wyjście jest umowne, gdyż



Rysunek 4. Proponowany przez symulator LTspice symbol klucza CD4066



Rysunek 5. Zmodyfikowany według własnego uznania symbol klucza CD4066

klucz jest elementem dwukierunkowym i powyższe funkcje mogą się zamieniać miejscami.

Jak widać na rysunku 5 w wprowadzeniach zasilania pozostawiono widoczne etykiety, w pozostałych zostały ukryte. Po narysowaniu symbolu graficznego można go zapisać jako CD4066.asy. Jeśli symbol był tworzony z zastosowaniem funkcji automatycznej generacji, to plik zostanie zapisany w katalogu C:\...\\LTspiceXVII\\lib\\sym\\AutoGenerated. Po zapisaniu symbolu nie zamykamy jeszcze edytora, gdyż do używania tak zdefiniowanego elementu, konieczne jest jeszcze określenie kilku atrybutów. Przeznaczone do tego celu okno edycyjne jest wywoływane np. naciśnięciem kombinacji Ctrl-A. (rysunek 6). Obowiązkowo należy wypełnić pola:

Prefix = X
Value = CD4066
ModelFile = C:\\LTspice_Roboczy\\modele\\CD4066.sub

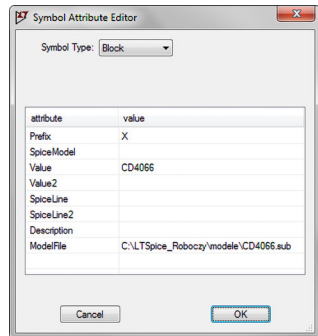
Jak widać, symbol został zapisany we własnym katalogu, dlatego w ostatniej pozycji dołączono ścieżkę dostępu. Mimo, że symbol schematowy klucza zawiera elementy graficzne, to został przygotowany na podstawie symbolu blokowego, dlatego na wyświetlanej u góry liście wybrano opcję „Block”. Pozostaje jeszcze umieszczenie oznaczenia schematowego i nazwy elementu. Wprowadzamy je używając komendy *Attribute Window* (Ctrl-W) i podświetlając pole „InstName”, a następnie akceptujemy wybór przyciskiem ekranowym OK. Oznaczenie Unnn umieszczamy w dogodnym miejscu. Podobnie postępujemy z nazwą. W tym przypadku wybieramy pole „Value”. Na tym kończy się definiowanie klucza. Jeszcze raz zapisujemy wyniki naszej pracy i możemy przystąpić do rysowania schematu.

Symbol klucza umieszczamy na schemacie naciskając przycisk F2, co powoduje wyświetlenie standardowej biblioteki elementów LTspice. Nasz klucz został umieszczony w katalogu [AutoGenerated] (rysunek 7). Pełny schemat pokazano na rysunku 2.

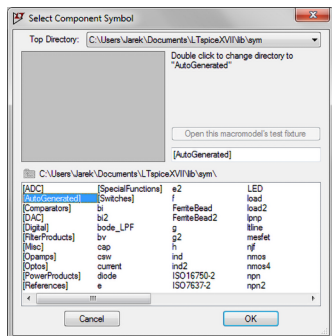
Symulacja

Aby wczuć się w rolę nawigatora bombowca proponuję wykonać serię symulacji, zmieniając za każdym razem położenie suwaka z pozycji np. 0,1 do 0,9 co 0,1 (decyduje o tym parametr s) i dodatkowo 0,01 oraz 0,99. Każda symulacja kończy się utworzeniem pliku dźwiękowego WAV. W poleceniu .wave RAF_s_0_50.wav 16 44.1k V(wy1) zawarta jest proponowana nazwa pliku (zamieniając ją warto uwzględnić frazę opisującą nastawę potencjometru – w powyższym przypadku 0.50). Pozostałe parametry określają rozdzielczość próbkowania (16 bitów) i częstotliwość próbkowania (44,1 kHz). Ostatni parametr tego polecenia określa węzeł, z którego pobierany jest sygnał (wy1). Przykładowe przebiegi dla położenia suwaka potencjometru w pozycjach 0,01, 0,5 i 0,8 pokazano na **rysunku 8**. Wykresy powstały w wyniku wykonania symulacji czasowej TRAN 3 tworzących 3-sekundowe sekwencje dźwiękowe.

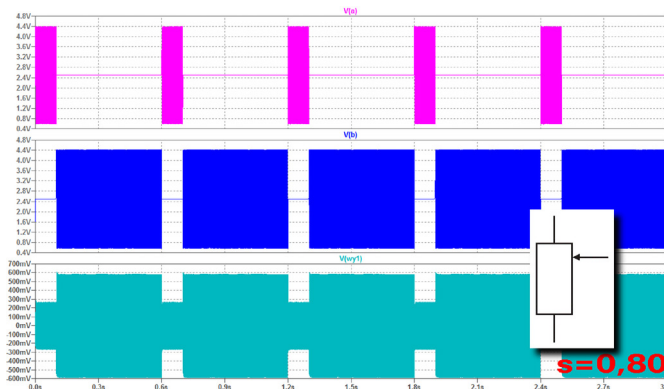
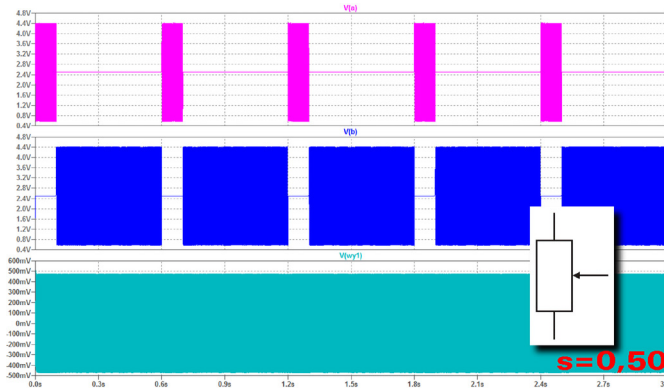
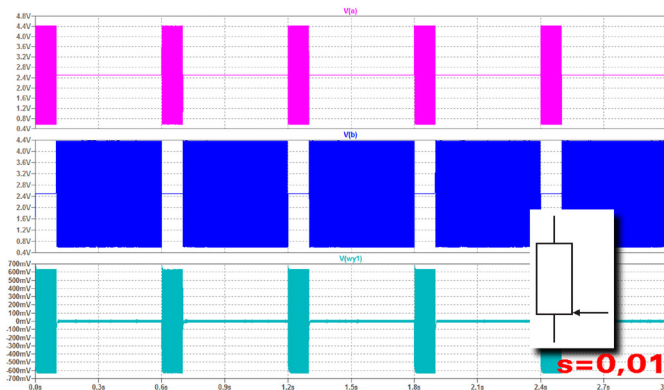
Na koniec warto wszystkie sygnały złączyć w całość, np. za pomocą programu Audacity, i odsłuchać dźwięki, które mógł słyszeć



Rysunek 6. Okno edycji własności definiowanego elementu



Rysunek 7. Lokalizacja folderu, w którym został umieszczony symbol klucza

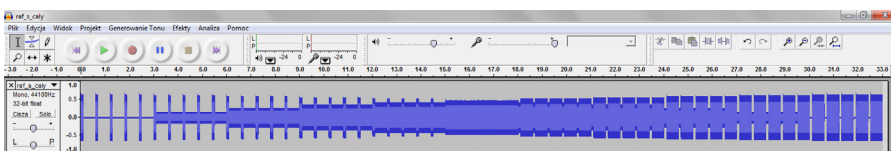


Rysunek 8. Wyniki symulacji modelu radionamiernika dla różnych położeń suwaka potencjometru a) s=0,01, b) s=0,50, s=0,80

w słuchawkach nawigator Lancastera podczas prowadzonego bombardowania (rysunek 9). Niestety nasz „podsluchiwany” nawigator przestrzelił ścieżkę i wypadł z prawidłowego kursu.

Weryfikacja praktyczna

Przedstawiona symulacja pozwala przede wszystkim sprawdzić założenia funkcjonalne projektu. W układzie rzeczywistym można spodziewać się pewnych różnic w odniesieniu do przyjętego w symulacji układu idealnego, co wynika choćby z zastosowania elementów o określonej tolerancji parametrów. Na przykład rozrzut rezystancji rezystorów wchodzących w skład sumatora sygnałów analogowych może wpływać na to, że nawet w przypadku idealnego zbalansowania sygnałów, w sygnale wyjściowym wystąpi przewaga któregoś ze znaków: „kropki” lub „kreski”. Przymykamy na to oko, tym bardziej, że do modelu zastosowano rezystory 10-procentowe.



Rysunek 9. Złożony w programie Audacity sygnał symulacji przeprowadzonych z różnymi ustawieniami suwaka potencjometru

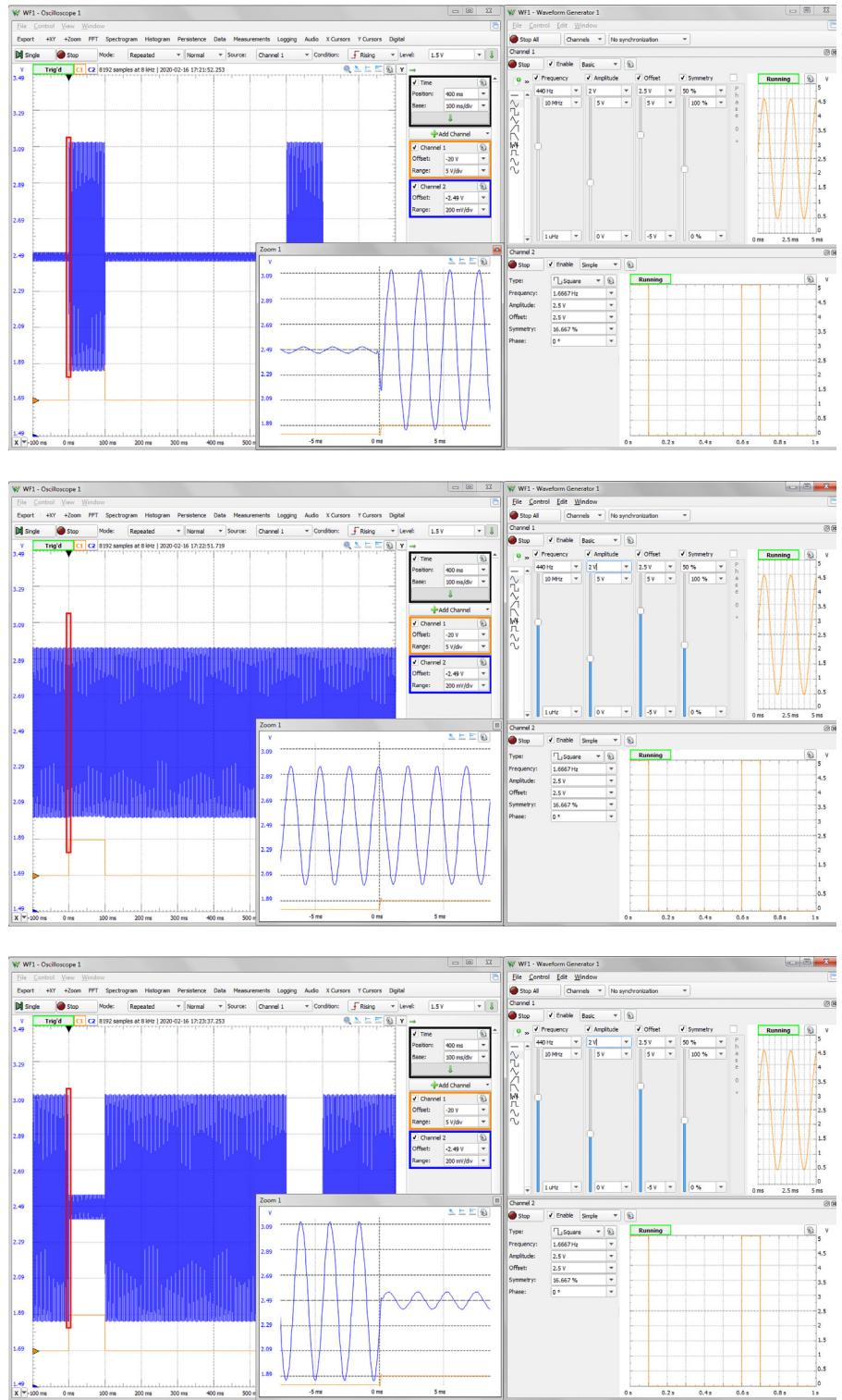
Układ tradycyjnie montujemy na breadboardzie (**fotografia 1**). Źródłem sygnału akustycznego w układzie rzeczywistym jest 1. kanał generatora arbitralnego Analog Discovery 2. Ustawiamy w nim częstotliwość 440 Hz, amplitudę 2 V, offset 2,5 V, przebieg sinusoidalny. Sygnał kluczujący jest generowany w kanale 2. Tym razem wybieramy przebieg prostokątny o częstotliwości 1,6667 Hz, amplitudzie 2,5 V, offsecie 2,5 V i współczynniku wypełnienia 16,667%. Parametry te odpowiadają tym, które przyjęto w symulacji: „kropka” trwa 100 ms, „kreska” 500 ms. Aby nie komplikować układu nie uwzględniono w nim wzmacniacza słuchawkowego. Zastosowano jedynie kondensator separujący składową stałą. Wyjście za tym kondensatorem można dołączyć do dowolnego wzmacniacza akustycznego. W układzie modelowym wykorzystano do tego gniazdko słuchawkowe i przewód zakończony wtykiem jack 2,5 mm. Masę gniazdka połączono z rzeczywistą (nie sztuczną) masą układu.

Wrażenia akustyczne trudno przedstawić słowem drukowanym. Można natomiast stwierdzić, że są one bardzo zbliżone do wyników symulacji. Nasuwa się wniosek, że gdyby tak działał prawdziwy radionamiernik RAF-u, to nawigator nie miałby łatwego zadania. Obsługa takiego urządzenia wymagałaby pewnego osłuchania i nabrania doświadczenia. Być może pracę nawigatorów należałoby porównać z radiotelegrafistami używającymi alfabetu Morse'a, którzy raczej nie wsłuchiwali się w pojedyncze znaki, a odczytywali słowa na podstawie melodii telegramów.

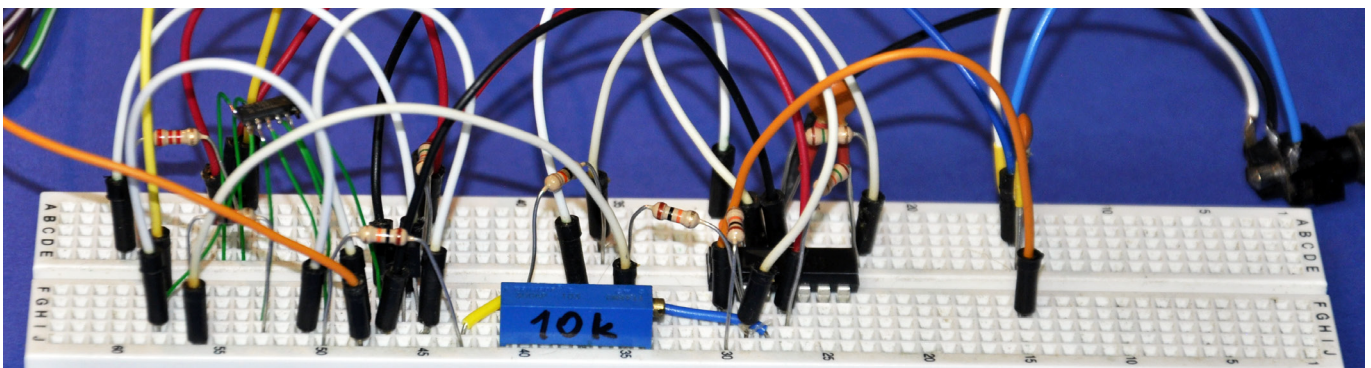
Punkt środkowy naszego modelu radionamiernika odpowiadający dokładnemu kursowi na cel nieco się rozmywa. Ciekawe w jakim stopniu przekładałoby się to na odchylenie od kursu, a tym samym na dokładność naprowadzenia bombowca nad cel.

Właściwie to jest wszystko co można powiedzieć na temat urządzenia, którym zajmowaliśmy się w artykule. Potwierdzeniem słuszności założeń projektu są wyniki symulacji oraz pomiary urządzenia rzeczywistego pokazane na **rysunku 10**. Zachęcam Czytelników do samodzielnego wykonania modelu i odsłuchania generowanych przez niego sygnałów. A w następnym odcinku zajmiemy się harmonicznymi.

Jarostaw Doliński, EP



Rysunek 10. Wyniki pomiarów urządzenia rzeczywistego za pomocą Analog Discovery 2



Fotografia 1. Układ zmontowany na płytce stykowej