

Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ MECHANICZNY
ENERGETYKI I LOTNICTWA



Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

Praca przejściowa

na kierunku Lotnictwo i Kosmonautyka
w specjalności Automatyka i Systemy Lotnicze

Symulacja systemu ostrzegania przed opromieniowaniem na potrzeby
symulatora lotu samolotu myśliwskiego, na przykładzie systemu SPO-10

Mateusz Brzozowski

Numer albumu 259652

promotor
mgr. inż. Janusz Gajda

Warszawa, 2019

Spis Treści

1.	Wprowadzenie.....	3
1.1.	Charakterystyka i zastosowanie.....	3
1.2.	Historia	3
1.3.	Systemy RWR a symulacja	4
2.	Charakterystyka systemu	5
2.1.	Struktura ogólna systemu RWR	5
2.2.	Specyfikacja systemu SPO-10	6
2.3.	Założenia modelu.....	7
3.	Identyfikacja systemu	9
3.1.	Model szczegółowy	9
3.1.1.	Źródło opromieniowania	9
3.1.2.	Moduł S3M-1	11
3.1.3.	Moduł S3M-3	12
3.2.	Odpowiedź modelu	14
4.	Model na potrzeby symulatora	16
4.1.	Omówienie modelu uproszczonego.....	16
4.1.1.	Przygotowanie danych	17
4.1.2.	Sygnalizacja świetlna.....	18
4.1.3.	Sygnalizacja dźwiękowa.....	19
4.2.	Weryfikacja modelu	19
5.	Podsumowanie	21
	Bibliografia.....	22

1. Wprowadzenie

Celem niniejszego projektu było stworzenie modelu symulacyjnego systemu ostrzegania przed opromieniowaniem na potrzeby symulatorów lotu, na przykładzie radzieckiego systemu SPO-10 lzd. S3M. W tym celu stworzony został najpierw szczegółowy model Simulink w celu ustalenia szczegółów zachowania i logiki systemu, a następnie stworzony został model uproszczony, działający w czasie rzeczywistym dla przykładowego wejścia i wyjścia.

1.1. Charakterystyka i zastosowanie

Systemy ostrzegania przed opromieniowaniem (ang Radar Warning Receiver, skr. RWR) to sensory pasywne służące do wykrywania fal radarowych z zewnętrznych źródeł w celu zapewnienia operatorowi informacji o obecności potencjalnych zagrożeń wykorzystujących radar, takich jak wyrzutnie rakiet ziemia-powietrze, systemy celownicze artylerii przeciwlotniczej czy samoloty myśliwskie, jak również o możliwości wykrycia przez radary przeszukujące. Pozwalają one zwiększyć świadomość sytuacyjną operatora w kwestii zagrożeń bez zdradzania pozycji maszyny. Systemy RWR są często integrowane z innymi sensorami (np. MLWS) oraz z systemami przeciwdziałania celem ich automatycznej obsługi lub asysty w ich obsłudze przez pilota.

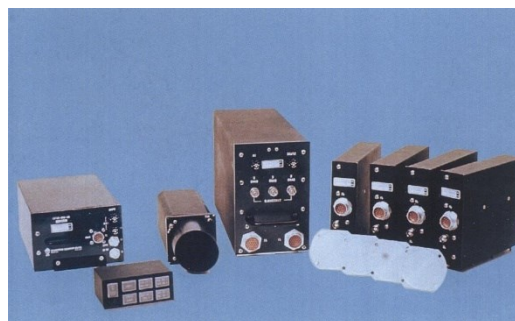
Pierwsze proste systemy (SPO-1/2) pojawiły się w związku radzieckim wraz z dalmierzami radarowymi w myśliwcach zachodnich, początkowo przetwarzały one jedynie sygnał z pojedynczej anteny skierowanej do tyłu na sygnał dźwiękowy. Wraz z rozwojem radzieckich systemów ziemia-powietrze podobne systemy zaczęto stosować na zachodzie (AN/APR-25). Dzisiejsze systemy RWR dokonują dokładnej identyfikacji radaru źródłowego i informują operatora o dystansie i/lub poziomie zagrożenia danego emitera.

1.2. Historia

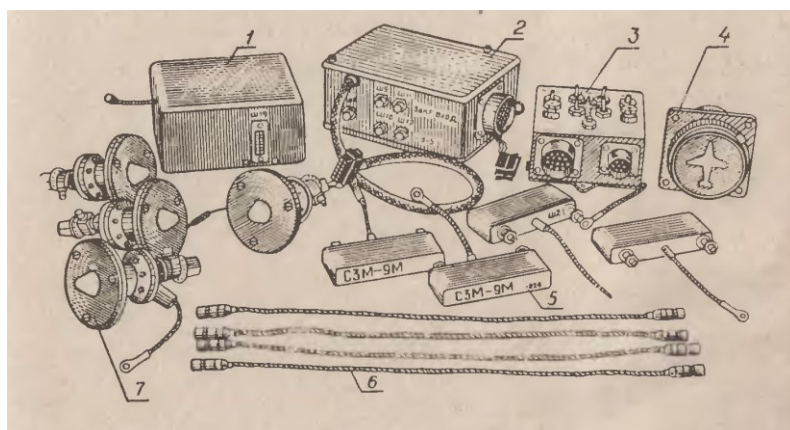
Rzecz dzieje się w połowie lat 60-tych, kiedy to pojawiły się zarówno pierwsze złożone rozwiązania wschodnie (SPO-10), jak również pierwsze rozwiązania zachodnie (AN/APR-25). Oba podejścia od początku znacząco się różnią: SPO-10 funkcjonuje w 4 zupełnie niezależnych kanałach i nie dokonuje żadnej identyfikacji sygnału, podczas gdy AN/APR-25 traktuje anteny jako szuk i pozwala określić stosunkowo dokładny namiar oraz (jakościowo) moc sygnału oraz



Rysunek 1 Schemat działania wyświetlacza AN/APR-25



Rysunek 2 System AN/APR-25



Rysunek 3 System SPO-10



Rysunek 4 Wskaźnik systemu SPO-15

dokonyuje detekcji w zdefiniowanych przez operatora zakresach częstotliwości prezentując wyniki na kineskopie, stanowiąc rozwiązanie znacznie bardziej kompleksowe.

Oba systemy ulegały dalszemu rozwojowi. SPO-15 (używany do dzisiaj w wielu konstrukcjach poradzieckich) dzieli wykryte emiterzy na sześć typów i prezentuje dokładniejsze informacje o namiarze oraz informacje o przewyższeniu celu, mocy sygnału i trybie pracy emitera. Na zachodzie, począwszy od systemu AN/APR-45 zaczęto stosować cyfrowe systemy ostrzegania, posiadające własny komputer, na którym dokonywana była analiza spektralna sygnału. Dzisiejsze systemy NATO-wskie identyfikują z dużą dokładnością typ radaru emitującego sygnał a zamiast surowej informacji o mocy sygnału i jego trybie pracy sortują emiterzy ze względu na stopień zagrożenia.

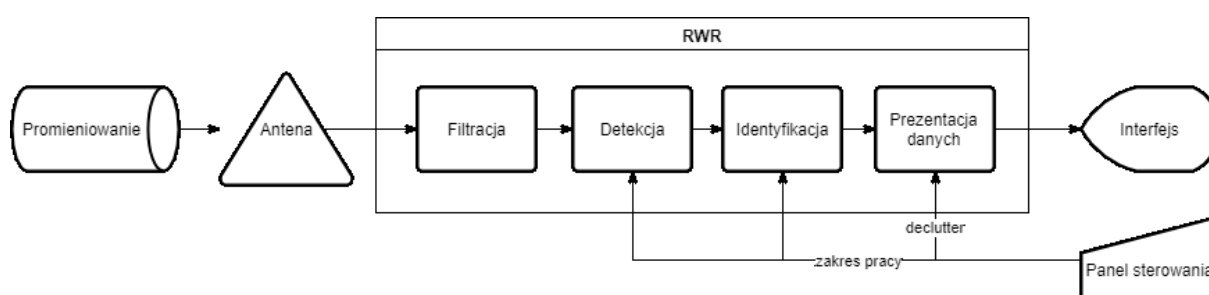
1.3. Systemy RWR a symulacja

Ze względu na istotną rolę jaką systemy te odgrywają na polu walki od czasu ich wprowadzenia, ich symulacja z odwzorowaniem ograniczeń jest potrzebna przy szkoleniu opartym o symulatory taktyczne. Jeżeli w danym środowisku symulowane są radary, wskazana jest również symulacja systemów ostrzegania przed opromieniowaniem.

2. Charakterystyka systemu

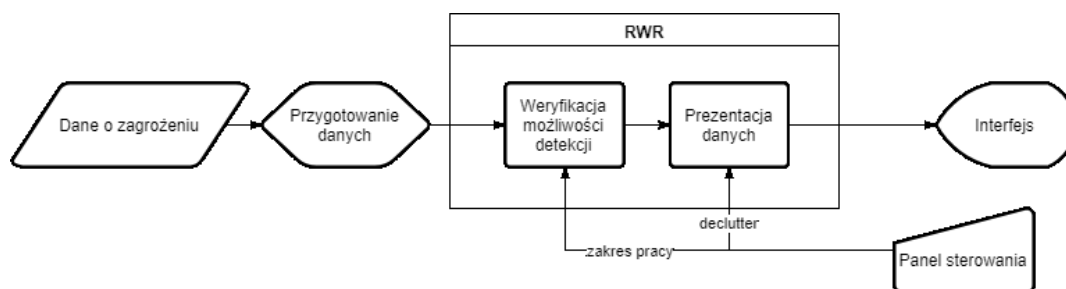
2.1. Struktura ogólna systemu RWR

System RWR jest systemem pasywnym, przetwarzającym nadchodzące obce (a więc o charakterystyce, która nie jest znana a priori) sygnały z zakresu wykorzystywanego do radiolokacji. Sygnały są odbierane przez anteny kierunkowe rozlokowane (w miarę możliwości) w taki sposób, aby objąć cały obszar wokół obiektu. W przypadku odbioru przez anteny sygnałów z zakresu wykorzystywanego przez radary powyżej progu detekcji, jest on przetwarzany. Kolejność i sposób obróbki sygnału zależy od danego systemu: wykorzystywane są filtry wielopasmowe, analiza spektralna. Celem obróbki jest zawężenie klasy zagrożeń do których może należeć wykryty emiter i ustalenie jego trybu pracy – we współczesnych systemach ustalany jest dokładnie typ radaru oraz wykrywano zmiany jego trybu pracy wskazujące na odpalenie pocisków. Dane są następnie prezentowane operatorowi na wyświetlaczu panoramicznym (odległość od centrum reprezentuje przeważnie stopień zagrożenia lub siłę sygnału, a nie dystans). Ze względu na swoją zasadę działania i zastosowanie systemy te nie wymagają przeważnie ingerencji operatora, chyba że ze względu na ilość wyświetlanych danych konieczne jest zawężenie zakresu pracy systemu. W nowoczesnych systemach ma to miejsce dopiero na etapie prezentacji danych, wraz z możliwością zmiany rozplanowania na bardziej czytelne.



Rysunek 5 Schemat rzeczywistego systemu RWR

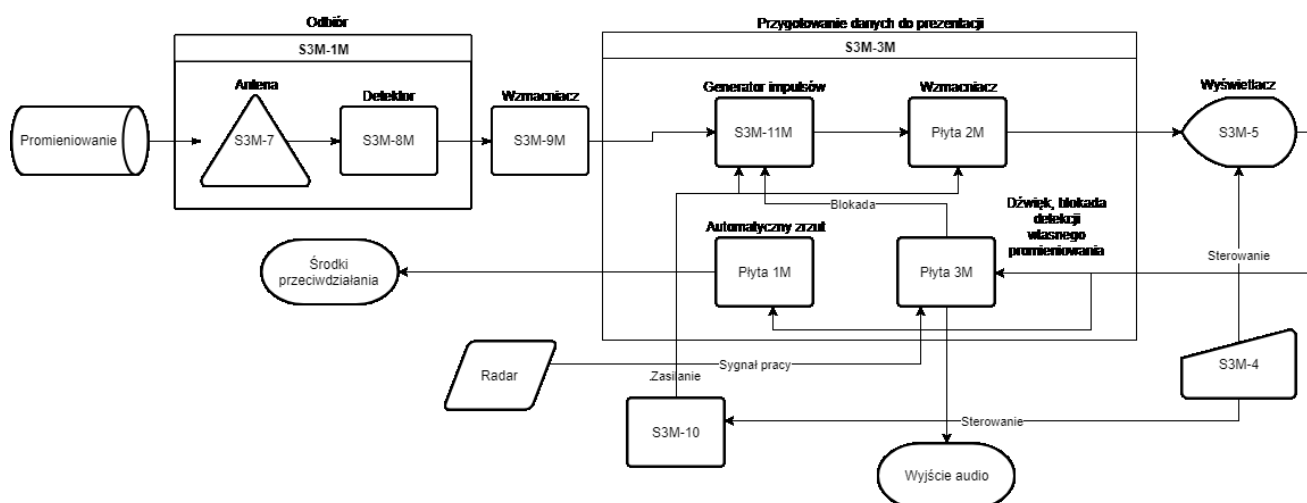
Przy odtwarzaniu funkcjonalności takiego systemu na potrzeby symulatora lotu większość danych, których uzyskanie jest celem tego systemu, jest znana a priori. To zmienia strukturę w znaczący sposób, ponieważ część systemu wymagająca dokładnego odtworzenia zaczyna się tak naprawdę na prezentacji danych – przygotowanie tych danych odbywa się w sposób behawioralny, tak aby odtworzyć możliwości i ograniczenia systemu mając do dyspozycji zbiór danych kompletnie inny od tego, na którym działa prawdziwy system. Na bazie tych danych należy ustalić, czy prawdziwy system dokonał by detekcji, a następnie zaprezentować dane odpowiednie do danego przypadku.



Rysunek 6 Schemat symulacji typowego systemu RWR

2.2. Specyfikacja systemu SPO-10

SPO-10 Syrena-3M (rus. СПО-10, Станция Предупреждения об Облучении – stacja ostrzegania przed opromieniowaniem) jest prostym systemem RWR konstrukcji radzieckiej używany w latach 60 i 70, zastąpiony następnie przez bardziej złożony SPO-15. System jest ten w zasadzie złożeniem 4 sztuk systemu SPO-3 Syrena-3, po jednej na każdy kanał obserwacji, pokrywając w ten sposób 360° wokół samolotu. System nie dokonuje rozpoznania źródła opromieniowania, występuje jedynie filtracja wynikająca z doboru zakresu częstotliwościowego pracy anten od 2 do 10 GHz [1] oraz z praktycznego zakresu częstotliwości powtórzeń impulsów od 1000 do 8000 Hz (a teoretycznie dowolnej od 780 Hz), który może obsłużyć moduł generujący sygnały świetlne. Moduł odbiorczy (antena i detektor) wychwytywać fale o irradiancji $9,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (dla optymalnej częstotliwości roboczej) System dla każdej detekcji generuje impuls o długości od 40 do 140 ms (nominalnie 80), który prezentowany jest operatorowi w formie sygnału świetlnego na wskaźniku (4 lampki rozlokowane na planie pierścienia zgodnie z kierunkiem, w którym skierowana jest antena danego kanału) oraz sygnału dźwiękowego tej samej długości i częstotliwości 800 Hz.



Rysunek 7 Schemat systemu SPO-10 w pojedynczym kanale

System podzielony jest na moduły, z których każdy wykonuje jedno z zadań wymienionych na Rysunek 5:

- Moduł S3M-1 – moduł odbiorczy, składający się z anteny (moduł S3M-7) i detektora (S3M-8). Detektor jest bardzo prosty w konstrukcji (pojedynczy induktor i dioda z

uziemia) i jego działanie ogranicza się do prostowania wzbudzonego w antenie prądu i blokowania zbyt słabych impulsów (szum).

- Moduł S3M-9 – wzmacniacz wielostopniowy z automatyczną regulacją wzmocnienia, wzmacnia i normalizuje wyjście odbiornika
- Moduł S3M-3 – „serce” systemu odpowiedzialne za przetwarzanie sygnału. Składa się z następujących układów:
 - S3M-11 – przetwarza sygnał z S3M-9 na 80 ms impulsy sterujące dla wyświetlacza
 - Płyta 1M – układ odpowiadający za automatyczny zrzut środków przeciwdziałania po odebraniu sygnału śledzącego (powtarzające się szybko impulsy 80ms) z wyświetlacza
 - Płyta 2M – wzmacnia sygnał z modułu S3M-11
 - Płyta 3M – składa się zasadniczo z dwóch układów na jednej płytce – generatora dźwięku, odbierającego sygnał z wyświetlacza i generującego sygnał 800 Hz, kiedy świeci się lampka któregośkolwiek kanału, oraz układu blokującego moduł S3M-11 podczas wysyłania impulsów przez własny radar
- Moduł S3M-5 – wyświetlacz pokładowy. Składa się z 5 lamp sygnalizacyjnych, 4 odpowiadających poszczególnym kanałom układu, sterowanych sygnałem wygenerowanym w module S3M-11 oraz jednej sygnalizującej wyłączenie sygnału dźwiękowego (za równo z powodu awarii jak i jego ręczne wyłączenie przez operatora). Oprócz tego Wbudowany w wyświetlacz jest przycisk testu (wymuszający świecenie wszystkich lampek i sygnał dźwiękowy). Zewnętrzna część obudowy umieszczona nad lampami i zawierająca kolorowe filtry obraca się, pozwalając na wybór koloru lampek (żółty do lotów w dzień, czerwony do lotów w nocy).
- Moduł S3M-4 – moduł sterowania, stosowane są różne moduły o różnych opcjach kontroli w zależności od maszyny. W myśliwcach jest on ograniczony do pulpitu zewnętrznego i włącznika w kokpicie
- Moduł S3M-10 – zasilacz

2.3. Założenia modelu

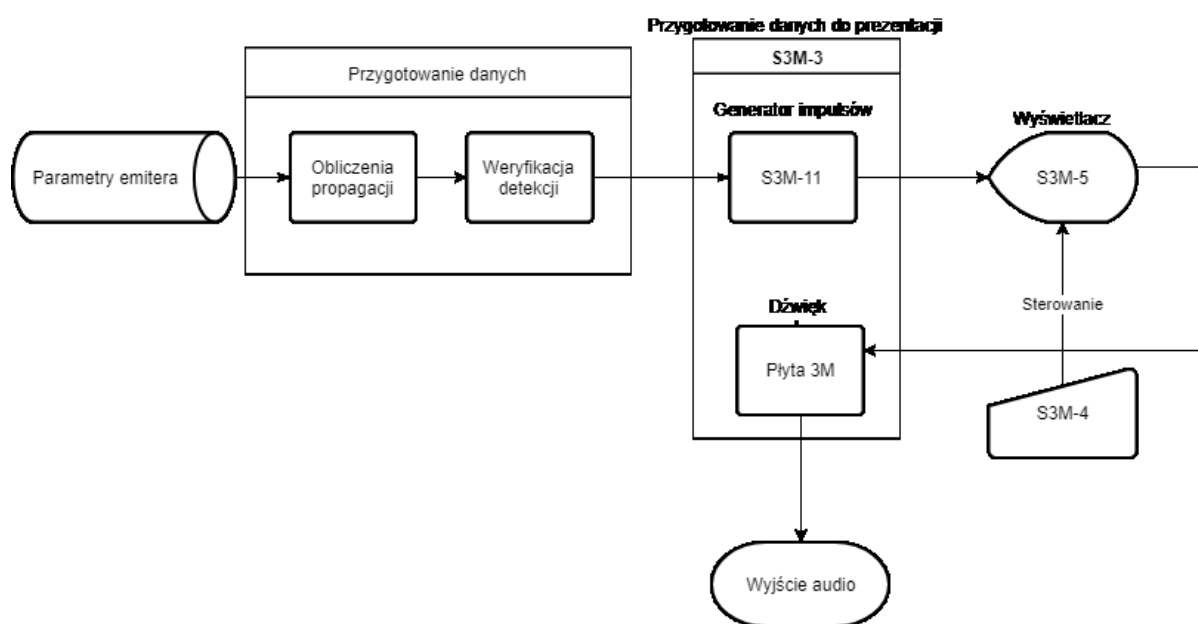
Na potrzeby tego projektu przygotowano dokładny model do celów identyfikacji i model uproszczony na potrzeby symulatorów lotu.

Model dokładny odwzorowuje działanie każdego istotnego podzespołu, przy następujących założeniach:

- Referencyjny emiter to szysk antenowy 2x2 złożony z anten izotropowych o dowolnej częstotliwości pracy (0-1e20 Hz)
- Sygnał referencyjny to sinusoidalny sygnał impulsowy z liniowo modulowaną częstotliwością o częstotliwości impulsów 4 kHz, szerokości impulsu 100 μ s, szerokości pasma 6 MHz i próbkowany z częstotliwością 15 MHz.
- Dodatkowym wejściem jest fala ciągła (FMCW) o okresie modulacji 100 μ s i szerokości pasma 6 MHz
- Sygnał jest propagowany w wolnej przestrzeni
- Antena odbiorcza zdefiniowana jest jednoelementowy szysk antenowy o charakterystyce promieniowania odpowiadającej częstotliwości średniej f_B z [2].

Ponieważ dokładne częstotliwości nie są znane, stosowana jest charakterystyka dla częstotliwości średniej

- Zakres pracy anteny odbiorczej przyjęty jest od 0 do 12 GHz, co pozwoliło na zastosowanie mniejszych, „przeskalowanych” częstotliwości w sygnale nadanym (duża różnica pomiędzy częstotliwością pracy anteny i generatora impulsów skutkowałyby w przeciwnym wypadku bardzo długim czasem symulacji, nie wnosząc nic do jej jakości)
- Ze względu na utratę informacji o amplitudzie i częstotliwości w trakcie przetwarzania, po detekcji sygnał przekształcono w znormalizowany sygnał binarny do dalszego przetwarzania w celu przyspieszenia symulacji.
- Szum generowany we wzmacniaczach został pominięty
- Na potrzeby symulacji w czasie rzeczywistym (w symulatorze lotu) przyjęto, że platforma nie symuluje rozchodzenia się fal globalnie, lecz dostarcza informacji a priori o parametrach radaru: moc wejściową, zysk anteny, częstotliwość przeszukiwania, oraz pozycję emitera i tryb pracy.
- Podzespoły oparte o współpracę z innymi systemami samolotu (radar, wyrzutniki dipoli/flar) nie są symulowane
- Rozpraszanie i pochłanianie fal radarowych przez konstrukcję samolotu nie jest symulowane, ponieważ jego efekt zależy od konkretnej maszyny i sposobu instalacji układu (ekranowanie itp.)

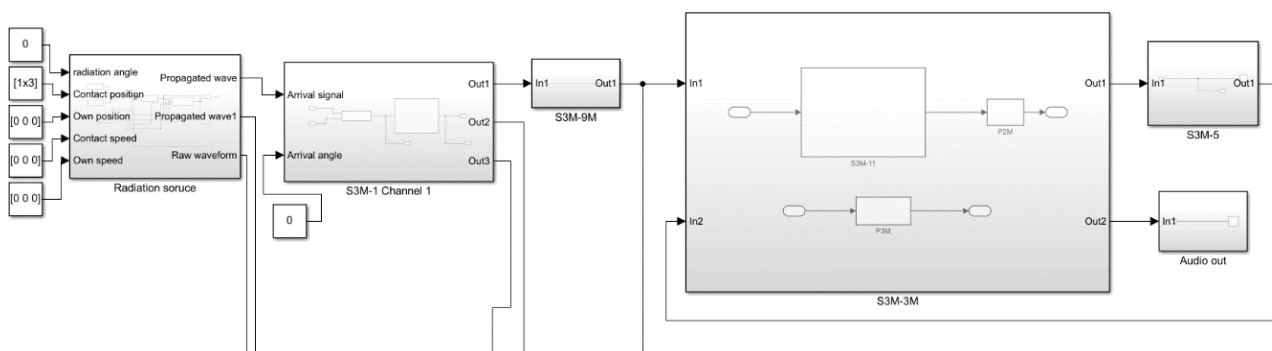


Rysunek 8 Symulacja w czasie rzeczywistym

3. Identyfikacja systemu

Do zbadania zachowania systemu stworzono dokładny model systemu, w tym model nadajnika i odbiornika stworzony przy użyciu Phased Array System Toolbox. Celem było wychwycenie potencjalnych zachowań systemu nieprzewidzianych w instrukcji eksploatacyjnej. Ostatecznie model nie wykazał istotnych z (operacyjnego punktu widzenia) niezgodności z opisem. Model szczegółowy nie jest modelem czasu rzeczywistego i ogranicza się do najważniejszych systemów: modułu odbiorczego i modułu przetwarzającego sygnał wejściowy na sygnał świetlny prezentowany operatorowi.

3.1. Model szczegółowy



Rysunek 9 Model szczegółowy

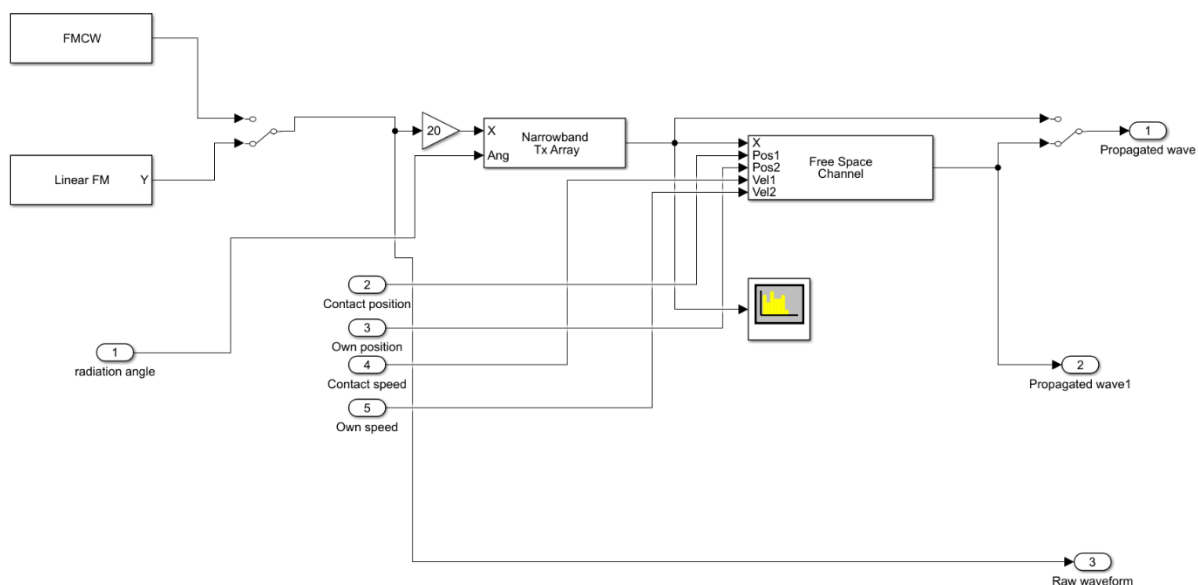
Model szczegółowy obejmuje następujące podzespoły:

- S3M-1, w tym:
 - S3M-7 - antena
 - S3M-8 - detektor
- S3M-3:
 - S3M-11 – generowanie sygnału świetlnego
 - Płyta 2M – wzmacnienie

Oraz symulację przykładowego emitera oraz propagacji fal. Podzespół S3M-9 (wzmacniacz) i płyta 3M (audio) są zaznaczone, lecz nie są symulowane. Symulacja płyty 2M (wzmacniacz) ogranicza się do wprowadzenia opóźnienia 1 ms, S3M-5 i wyjście audio zawierają tylko scope.

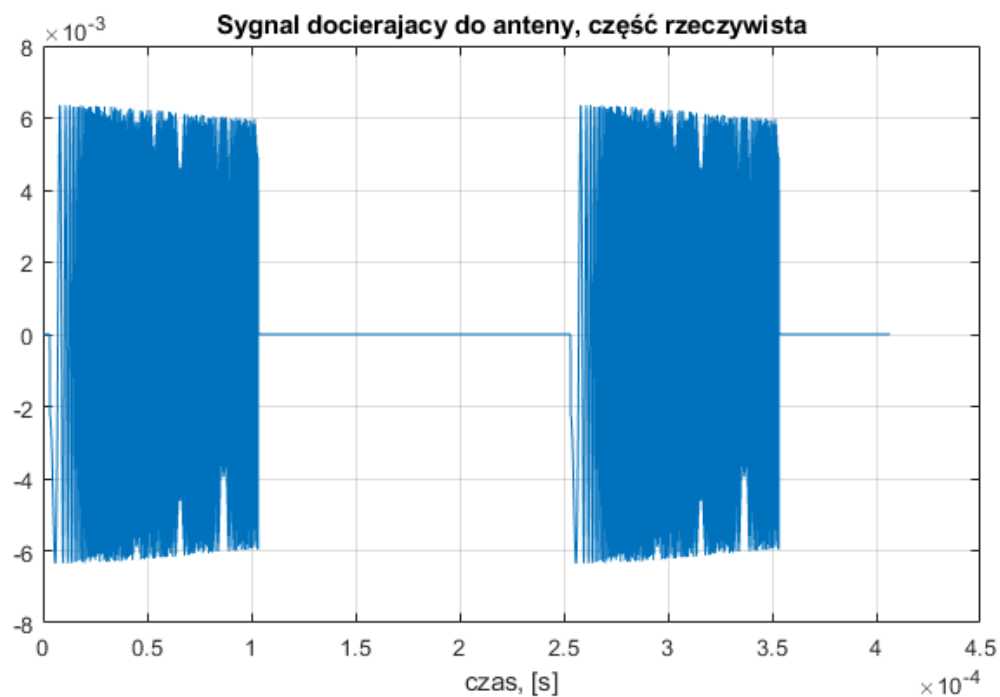
3.1.1. Źródło opromieniania

Model źródła opromieniania wykonany został w oparciu o Phased Array System Toolbox, według założeń wymienionych w rozdziale 2.3. Schemat modelu przedstawiony jest na Rysunek 9. Na wejściu dane są dwa źródła fal radiowych, jedno impulsowe, drugie ciągłe. Warto zaznaczyć, że działają one w częstotliwościach dekametrowych, zamiast centymetrowych – ma to na celu przyspieszenie symulacji w związku z dużą różnicą rzędów wielkości pomiędzy częstotliwościami pracy radaru a częstotliwościami obserwowanymi w generatorze sygnałów świetlnych. Ze względu na niski stopień skomplikowania systemu nie ma to jednak znaczącego wpływu na wyniki.



Rysunek 10 Źródło promieniowania

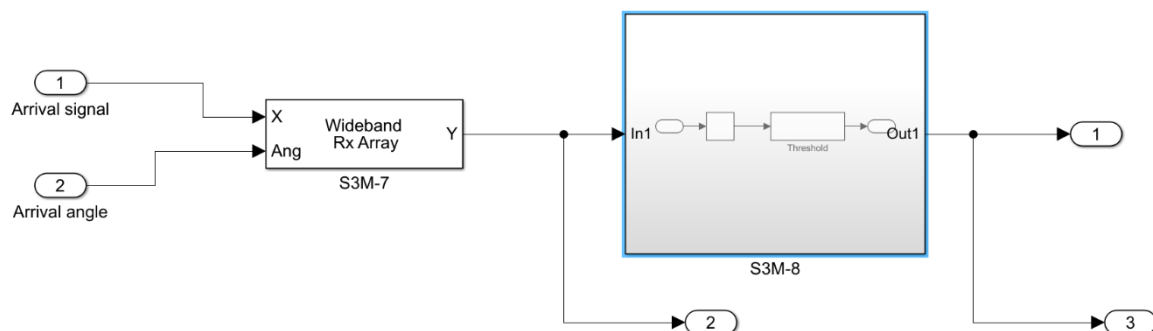
Sygnały są następnie przekazywane do modelu szyku antenowego 2x2, a potem poprzez model rozprzestrzeniania w wolnej przestrzeni przekazywany jest dalej do S3M-7. Poniższy wykres przedstawia sygnał wyjściowy impulsowy.



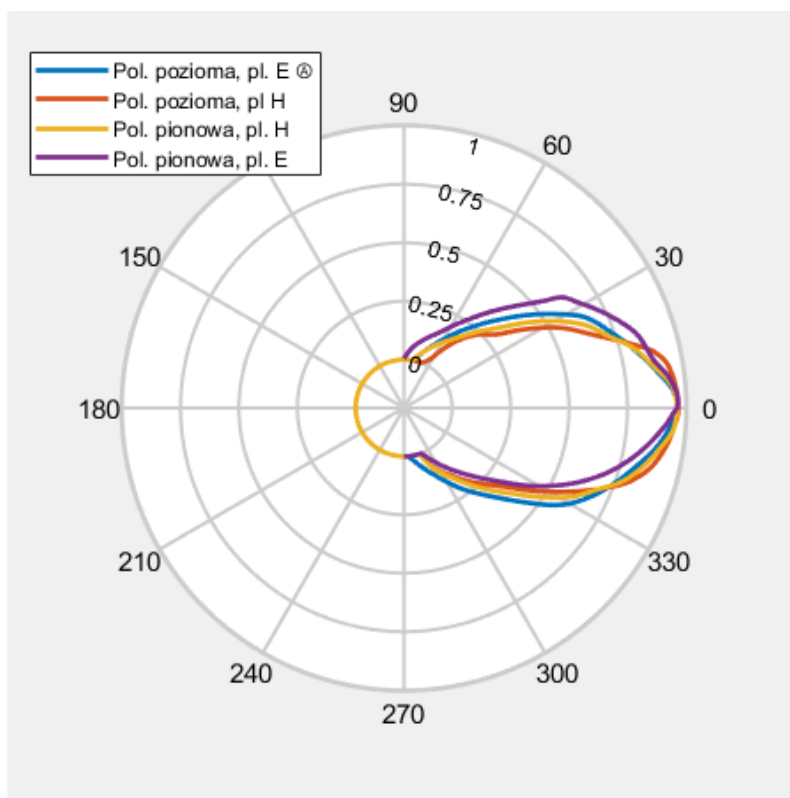
Rysunek 11 Wyjście ze źródła promieniowania

3.1.2. Moduł S3M-1

Moduł S3M-1 składa się z anteny odbiorczej S3M-7 i detektora S3M-8. S3M-7 został zaimplementowany jako szerokopasmowy szysk antenowy składający się z jednego elementu. Element ten jest zdefiniowany w pliku init.m na podstawie charakterystyk zawartych w dokumentacji. Poniższy wykres przedstawia te charakterystyki. Charakterystykę trójwymiarową oszacowano poprzez ważne uśrednienie charakterystyk wycinków.

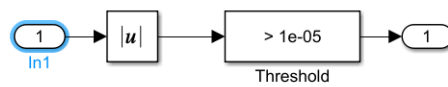


Rysunek 12 Moduł S3M-1

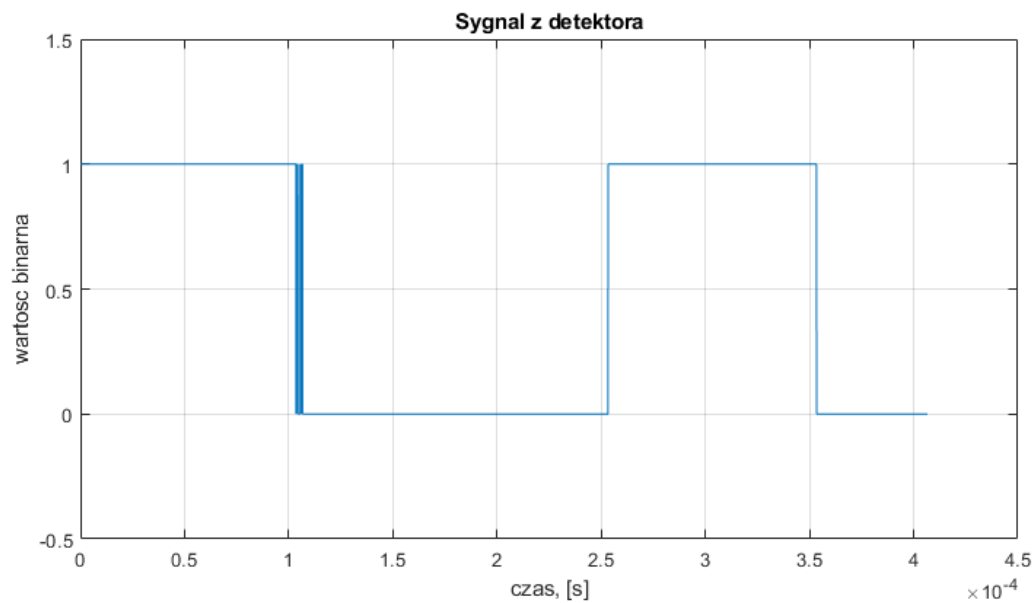


Rysunek 13 Charakterystyka promieniowania anteny

Moduł detektora (S3M-8) został uproszczony do wykrywania progowej wartości amplitudy przychodzącego sygnału. W tym miejscu zostaje on również przetworzony na sygnał binarny, ponieważ w tym miejscu tracone są informacje na temat częstotliwości przychodzącego sygnału (ale nie częstotliwości powtarzania impulsów), a w module wzmacniacza zostanie utracona informacja o mocy.

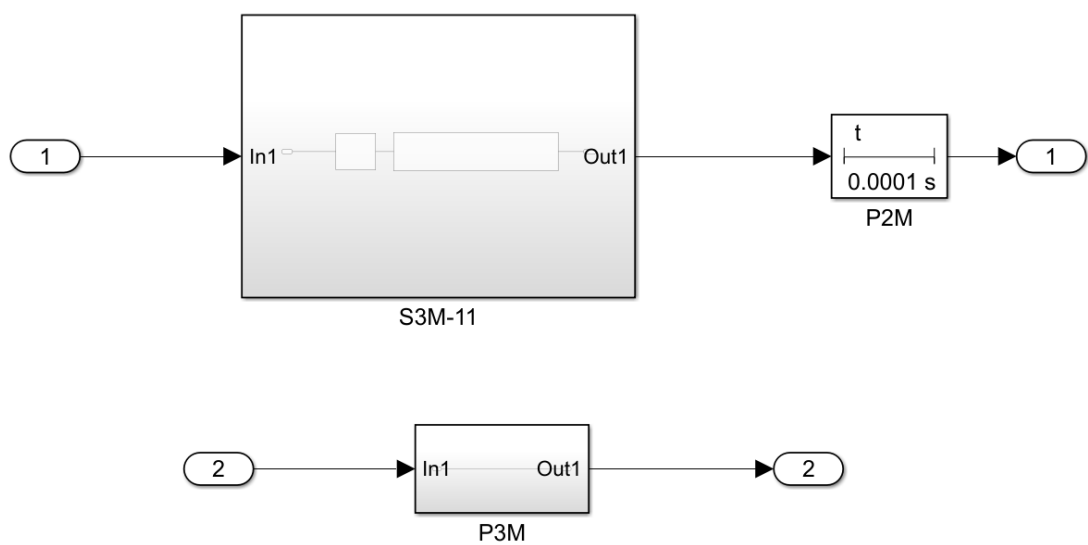


Rysunek 14 Detektor S3M-8



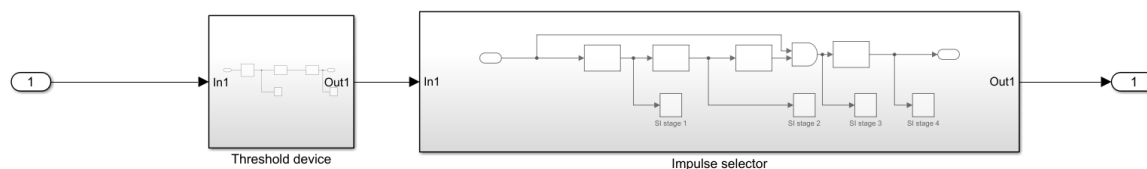
Rysunek 15 Wyjście detektora

3.1.3. Moduł S3M-3



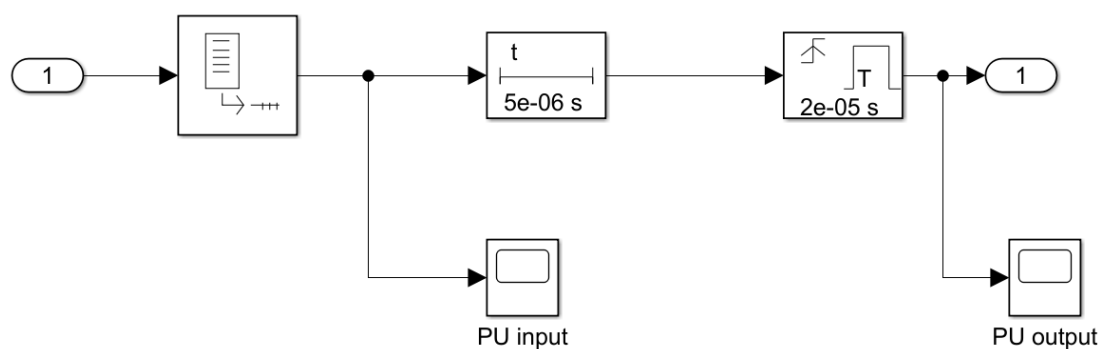
Rysunek 16 Moduł S3M-3

W kolejnym module następuje generowanie sygnałów świetlnych i dźwiękowych, przekazywanych dalej na wskaźnik S3M-5. Moduł dźwięku (płyta 3M) nie jest symulowany, z modułu wzmacniacza symulowane jest jedynie przesunięcie fazowe (opóźnienie). Moduł S3M-11 został zamodelowany szczegółowo



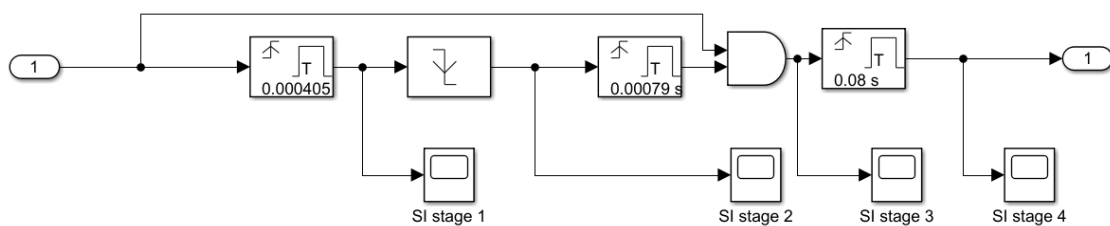
Rysunek 17 Moduł S3M-11

Moduł S3M-11 składa się z dwóch podzespołów. Pierwszy z nich wykrywa sygnał ze wzmacniacza S3M-9 powyżej poziomu szumu, i za pomocą multiwibratora przetwarza go na sygnał impulsowy o długości pojedynczego impulsu wynoszącej 20-25 μs . Tutaj następuje również odcinanie sygnału w czasie pracy własnego radaru.



Rysunek 18 Wykrywacz progu modułu S3M-11

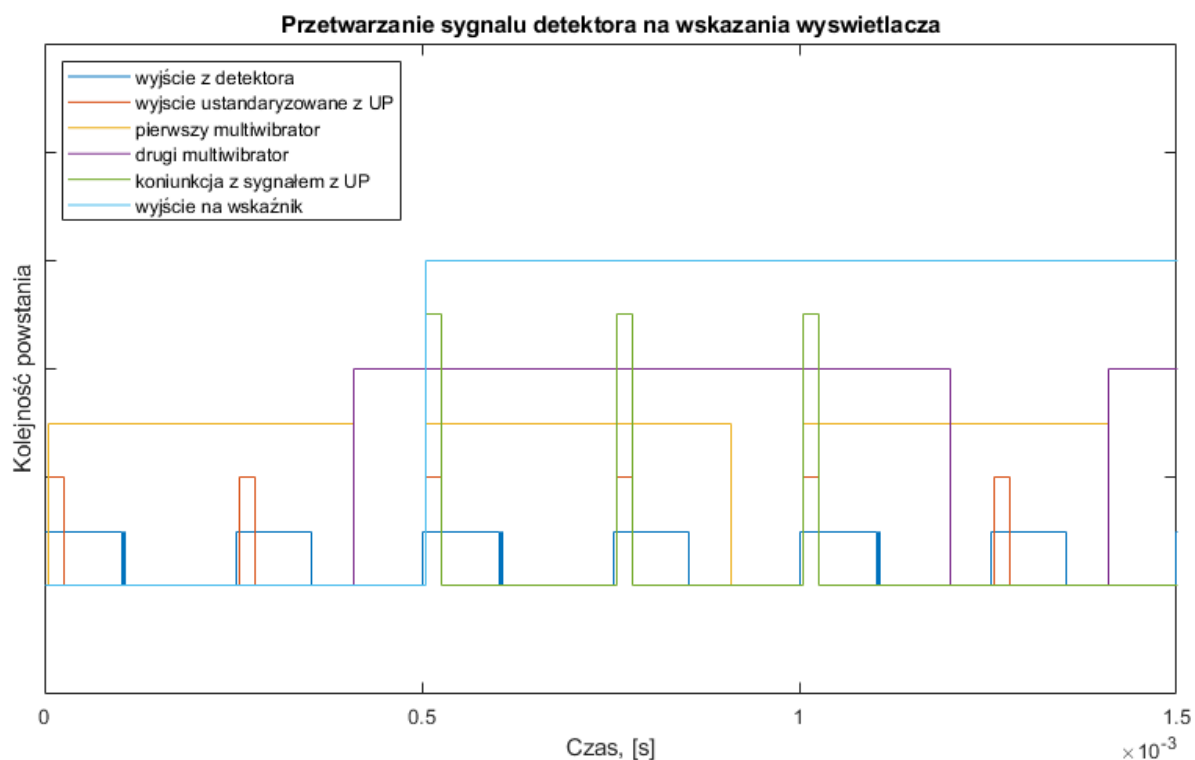
W drugim podzespole otrzymany sygnał wzbudza pojedynczy impuls kolejnego multiwibratora o długości 405 μs , sygnał ten jest następnie różniczkowany w celu wykrycia zbocza opadającego, co uruchamia sygnał 790 μs z kolejnego multiwibratora. Ten sygnał ulega z kolei koniunkcji z sygnałem wchodzącym do podzespołu – jeżeli w czasie impulsu 790-mikrosekundowego nastąpi kolejna detekcja uruchamiany jest ostatni multiwibrator, generujący sygnał o długości 80 ms. Ten sygnał przekazywany jest dalej na wskaźnik.



Rysunek 19 Selektor impulsów modułu S3M-11

3.2. Odpowiedź modelu

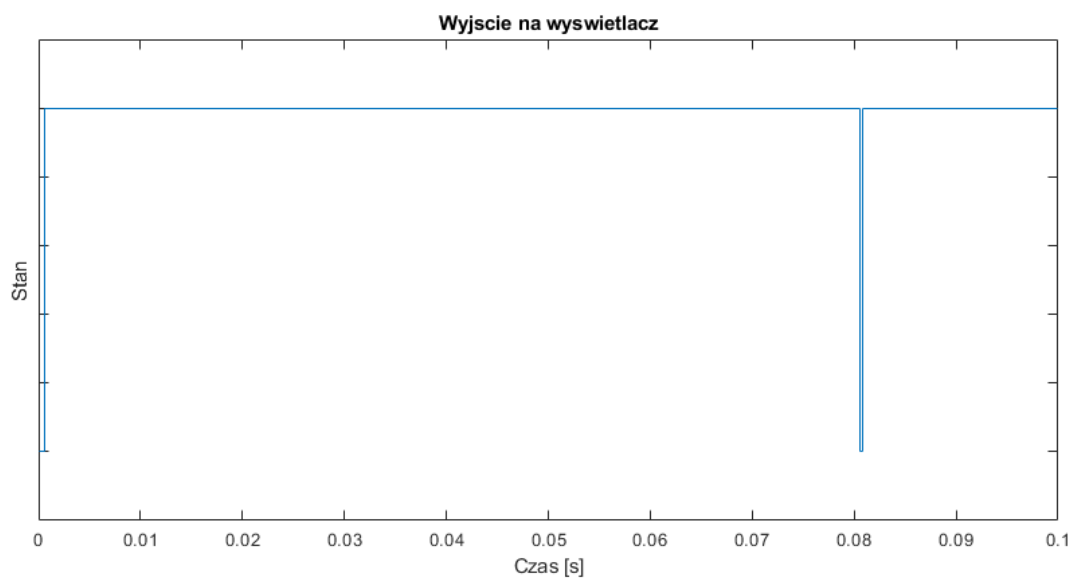
Poniższy wykres przedstawia zestawienie powstawania kolejnych impulsów w czasie, od wyjścia odbiornika, do wyjścia na wskaźnik w kokpicie. Pozycja na osi pionowej przedstawia (od dołu) kolejność źródeł impulsów w toku symulacji, od detektora po wyjście. Ostatni impuls został odcięty – kończy się on 80 ms dalej. Cała ta sekwencja odbywa się zasadniczo wewnątrz modułu S3M-11.



Rysunek 20 Wejście i wyjście z modułu S3M-11

Sygnał ten przechodzi jeszcze przez jeden wzmacniacz, po czym przekazywany jest bezpośrednio do poszczególnych lampek na wyświetlaczu S3M-5. Poniższy wykres pokazuje wyjście dla wejściowego sygnału impulsowego przedstawionego w rozdziale 3.1.1. Sygnał na wyjściu byłby w tej sytuacji praktycznie ciągły, z mikroprzerwami występującymi z częstotliwością 12.5 Hz. Zgodnie z [2] wynosi ona 6 Hz, jednak nie powinno to mieć wpływu na funkcjonalność systemu – wynika to

prawdopodobnie z faktu, że długość impulsu ostatniego multiwibratora nie jest stała – przyjęta wartość 80 ms jest wartością nominalną, rzeczywista może być o połowę krótsza.

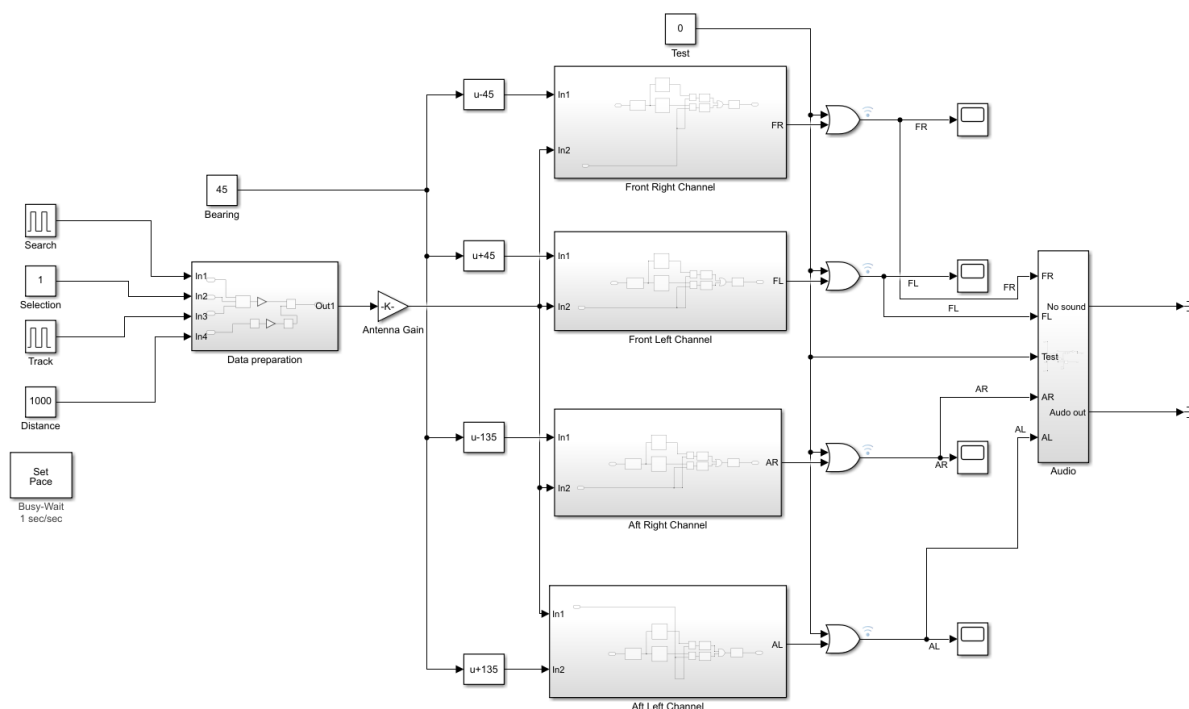


Rysunek 21 Wyjście do S3M-5

4. Model na potrzeby symulatora

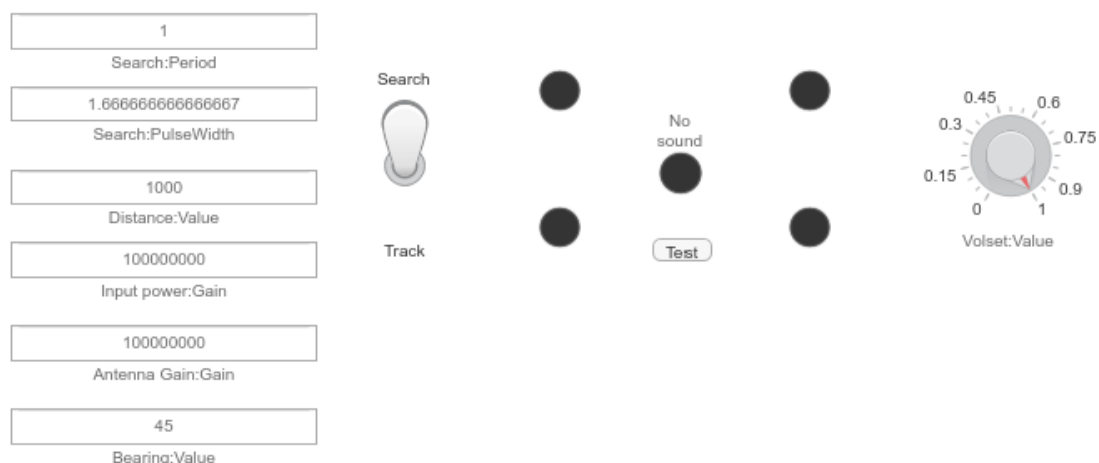
Powyższy model pozwolił zweryfikować zachowanie systemu, jednak na potrzeby symulatora lotu potrzebny jest model działający w czasie rzeczywistym i nieobciążający zbytecznie procesora, nawet (a być może w szczególności) jeżeli symulacja samego układu byłaby realizowana na urządzeniu imitującym. Na potrzeby odwzorowania działania systemu RWR nie ma potrzeby symulować rozchodzenia się fal, jeśli nie robi już tego za nas platforma. Zamiast tego należy ustalić na podstawie zebranych (z platformy i z sys-ID) danych czy detekcja w danym wypadku może mieć miejsce, i behawioralnie odwzorować działanie wskaźnika dla detekcji.

4.1. Omówienie modelu uproszczonego



Rysunek 22 Model uproszczony

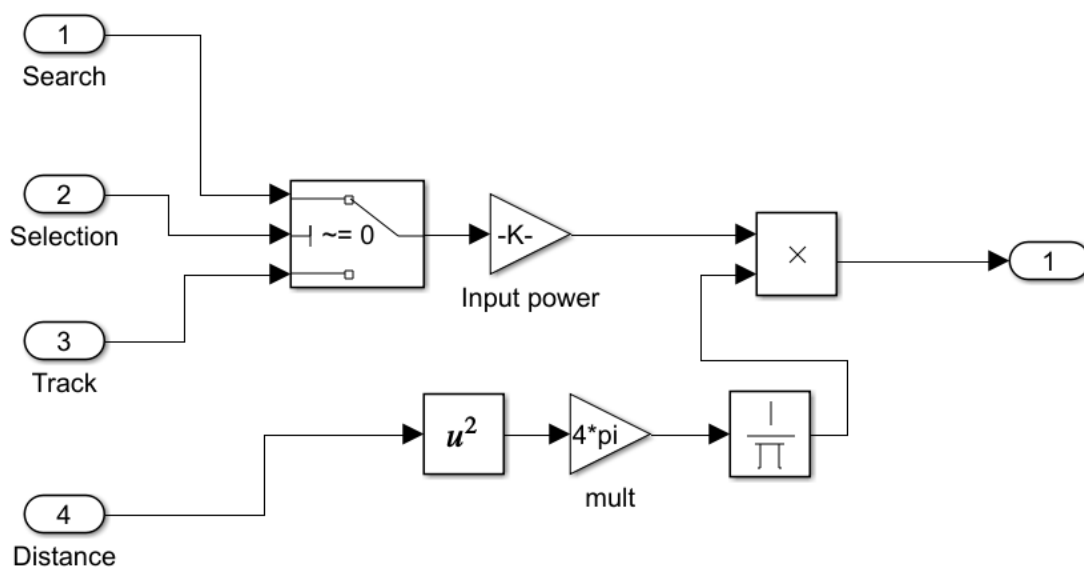
Model uproszczony składa się zasadniczo z dwóch części: podzespołu przygotowującego dane i sekcji generującej sygnał na wyjście imitatora. Dodatkowo przygotowany został przykładowy zestaw danych z platformy oraz przykładowy imitator na bazie Simulinkowego dashboarda. Sygnał dźwiękowy nie jest imitowany (ograniczenia Simulinka i wymóg użycia dodatkowego zestawu narzędzi), ale generowany jest sygnał sterujący dźwiękiem.



Rysunek 23 Tabela z przykładowymi danymi oraz przykładowy imitator

4.1.1. Przygotowanie danych

Na potrzeby tego projektu przyjęto, że dane są częstotliwość przeszukiwania, czas opromieniowania w czasie przeszukiwania, moc wejściowa radaru, zysk anteny radaru, odległość od radaru i namiar na cel. Zdefiniowane jest również czy radar pracuje w trybie przeszukiwania, czy śledzenia. W obu trybach na wejście dany jest generator impulsów prostokątnych, jednak szerokości i częstotliwości impulsów są inne – nie odpowiadają one jednak częstotliwości powtarzania impulsów radaru, są one dobrane do częstotliwości z jaką wykonywana jest pętla symulacji, tak aby zapewnić przynajmniej jedną klatkę bez sygnału po zakończeniu odliczania 80 ms sygnału wyjściowego.



Rysunek 24 Przygotowanie sygnału

Po wyborze formy sygnału jednostkowego, dodawany jest zysk odpowiadający mocy wejściowej anteny. Następnie wyliczana jest irradiancja na podanym dystansie do emitera, z prawa odwrotnych kwadratów:

$$S_g = \frac{P}{4\pi r^2} * K$$

Gdzie:

S_g – irradiancja kierunkowa w odległości r od emitera

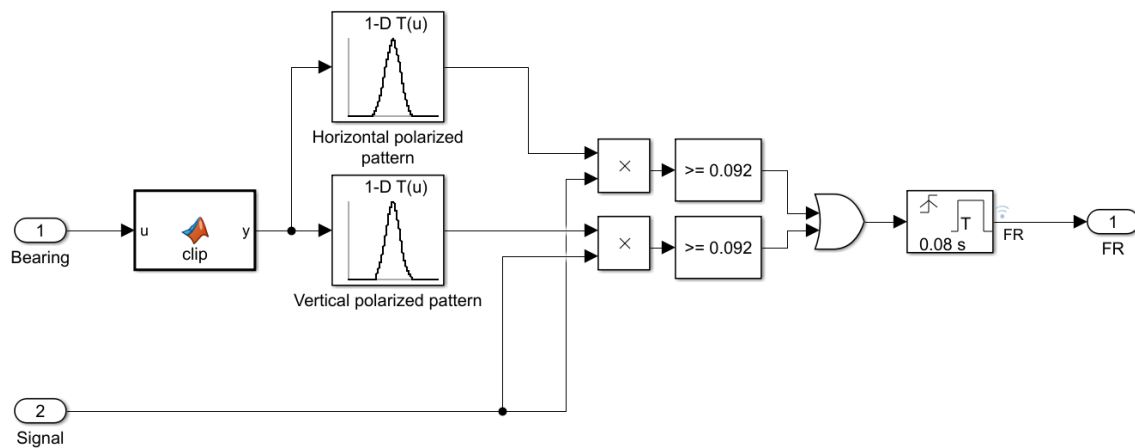
P – całkowita moc emitowana (straty pominięte)

r – odległość od emitera

K – zysk energetyczny anteny

Zysk anteny został zaimplementowany na wyjściu z tego podzespołu

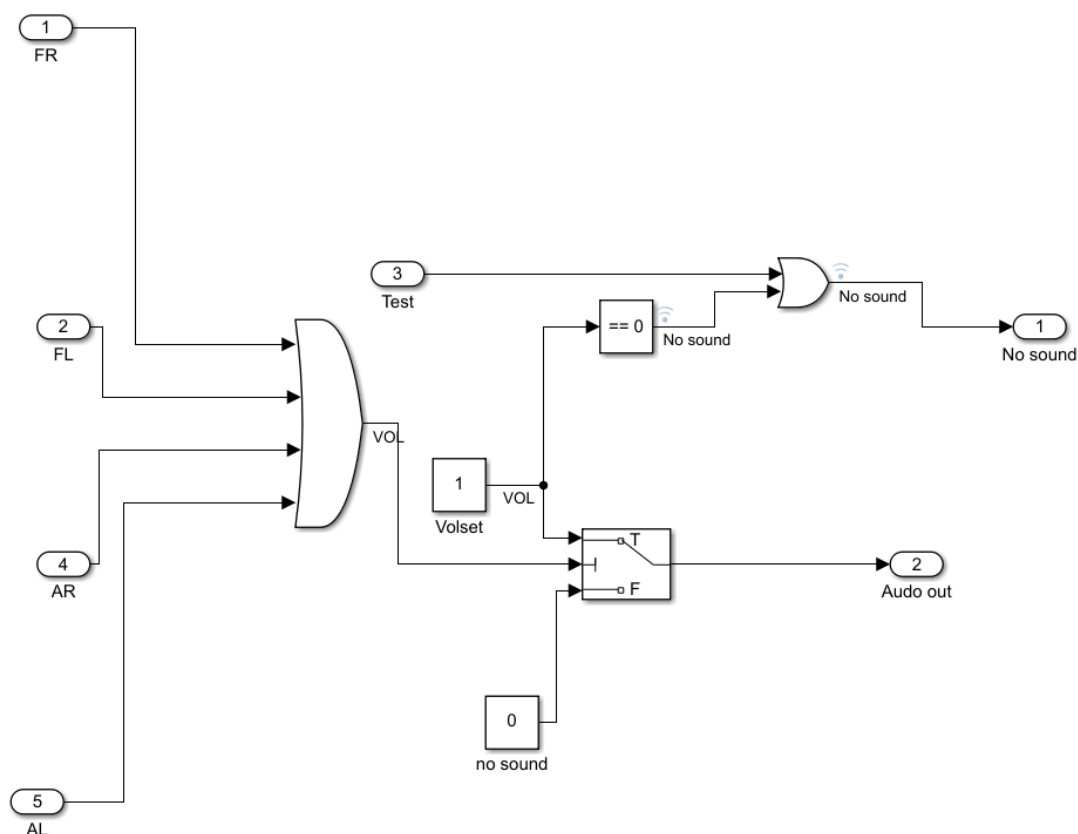
4.1.2. Sygnalizacja świetlna



Rysunek 25 Uproszczona symulacja pojedynczego kanału SPO-10

Na tym poziomie szczegółowości symulacja systemu jest już bardzo prosta, co pozwala na implementację wszystkich trzech kanałów. Na wejściu brany jest sygnał przygotowany w poprzednim podzespołe oraz namiar na cel, do którego dodawany jest bias odpowiadający umiejscowieniu anteny w samolocie. Z charakterystyki promieniowania zebranej na potrzeby poprzedniego modelu przygotowane są dwie tablice danych zawierające charakterystykę azymutalną, jedna dla polaryzacji pionowej i jedna dla poziomej. Na potrzeby tego przykładu przyjęta jest polaryzacja okrężna, więc odczytany zostaje mnożnik z obu charakterystyk (charakterystyka jest znormalizowana liniowo), i wymnażany jest przez niego uzyskany wcześniej sygnał (odpowiadający irradiancji w danym momencie). Następnie porównywany jest on z wielkością $9.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ uzyskaną z dokumentacji. Jeśli próg jest przekroczony dla jednej z polaryzacji wysyłany dalej jest 80 ms impuls, który odbierany jest przez lampki sygnalizacyjne kanałów oraz moduł sygnalizacji dźwiękowej.

4.1.3. Sygnalizacja dźwiękowa



Rysunek 26 Sygnalizacja dźwiękowa

Sygnalizacja dźwiękowa nie jest wykonywana na potrzeby tego modelu, jednak jest generowany sygnał sterujący, który może być wykorzystany przez platformę/imitator. Wyznaczana jest alternatywa sygnałów ze wszystkich czterech kanałów, która steruje przełącznikiem. Gdy z któregośkolwiek odbierane jest 1, dalej nadawana jest wartość ustawiona na pokrętle głośności, w przeciwnym wypadku nadawane jest 0. Jeżeli na pokrętle ustawione jest 0 na lampkę sygnalizującą brak dźwięku wysyłane jest 1.

Dodatkowo naciśnięcie przycisku testu na wyświetlaczu również powoduje zapalenie lampki sygnalizującej brak dźwięku równocześnie z zapaleniem wszystkich kanałów i sygnałem dźwiękowym. W prawdziwym systemie sygnał testowy jest wysyłany z płyty 1M na S3M-11 w celu sprawdzenia tego podzespołu, jednak bez symulacji awarii układu i/lub płyty 1M odtwarzanie tej funkcjonalności nie jest zasadne – sygnał testowy jest więc aplikowany za generatorami sygnału świetlnego.

4.2. Weryfikacja modelu

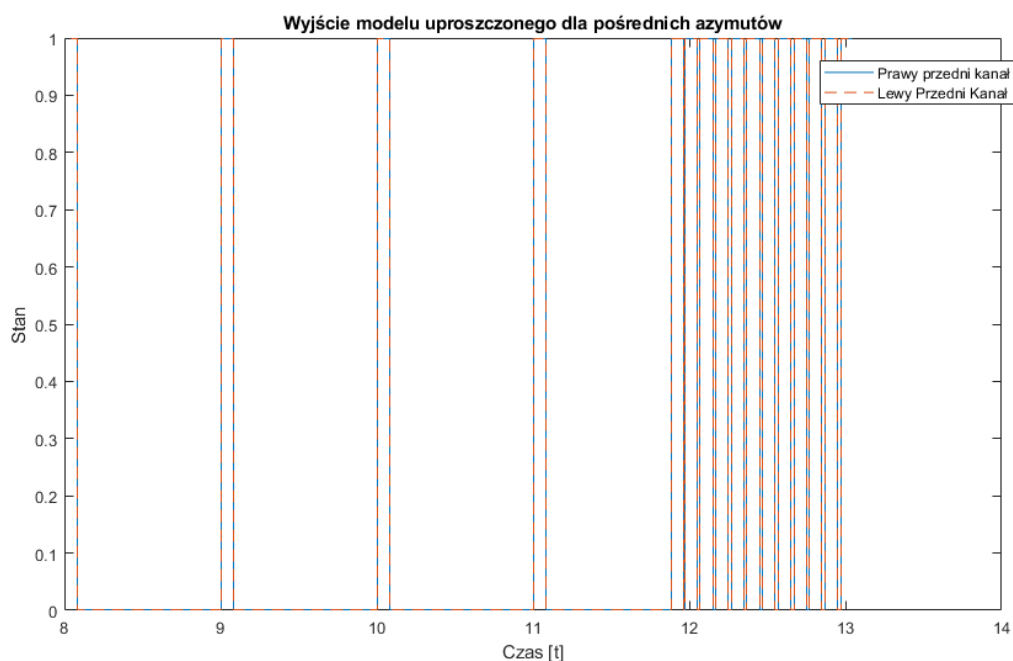
Zgodnie z dokumentacją systemu ([2], rozdział 11.5.6), przy odbiorze sygnałów z radarów przeszukujących, sygnał audiowizualny w postaci 80 ms impulsów powinien być generowany w takt pracy anteny przeszukującej, a częstotliwość impulsów powinna rosnąć wraz ze zbliżaniem się do zagrożenia. Ta ostatnia właściwość nie jest jednak właściwością samego systemu, lecz inherentną właściwością wszystkich systemów RWR wynikającą z wzorców przeszukiwania wykorzystywanych przez radary myśliwców – obszar jest przeszukiwany wszcz, w kilku rzędach (przeważnie 1, 2 lub 4)

obejmujących poszczególne zakresy wysokości tak aby objąć cały zakres nachylenia. Na granicy detekcji sygnał zostanie odebrany tylko wtedy, gdy odbiornik znajdzie się na osi głównego listka radaru nadającego sygnał. W miarę zbliżania się do źródła detekcja będzie następowała coraz dalej od osi, a ponieważ zasięg detekcji systemu RWR jest znacząco większy niż wykrywanego radaru, w pewnym momencie zaczną się pojawiać detekcje przy przeszukiwaniu sąsiednich rzędów do tego, który odpowiada wysokości odbiornika – co z kolei zwiększy częstotliwość detekcji. Nie jest to jednak właściwość na której operator może polegać jako funkcji systemu SPO-10 – jeżeli emiter przeszukuje w jednym rzędzie, nie da się ustalić odległości do niego bez znajomości amplitudy przychodzącego sygnału (która została utracona na samym początku przetwarzania).

Przy odbiorze sygnału śledzącego, lampki powinny migać z częstotliwością 6 Hz. W modelu migają one z częstotliwością ~ 12 Hz, jednak czas pomiędzy impulsami jest znikomy, więc świecą one praktycznie ciągle. Ustalenie skąd bierze się ten mechanizm było jednym z powodów stworzenia modelu identyfikacyjnego, jednak nie udało się znaleźć niczego co generowałoby taki sygnał w sposób celowy.

Sygnały z oddzielnych emiterów na sąsiednich lampkach można odróżnić od sygnału z jednego emitera na azymucie pomiędzy dwoma antenami po tym, że sygnały nie będą jednoczesne. Funkcjonalność ta została odtworzona na tyle, na ile pozwoliły na to możliwości graficzne Simulinka.

Poniższy wykres pokazuje sygnalizację dla pośrednich azymutów, sygnały na obu kanałach nakładają się na siebie.



Rysunek 27 Wyjście modelu uproszczonego

5. Podsumowanie

Na potrzeby tej pracy przygotowano ostatecznie dwa modele, jeden do identyfikacji, a jeden dla symulatora lotu. O ile model identyfikacyjny zadowalająco odtworzył działanie systemu o tyle nie wniósł on zbyt wiele w stosunku do danych uzyskanych z dokumentacji. Poza prostotą systemu (w skutek której potencjalny zysk z przeprowadzenia sys-ID był ograniczony) spowodowane jest to brakiem dostatecznej ilości danych, by przeprowadzić kompleksową analizę ograniczeń i nieprzewidzianych zachowań systemu.

Przykładem takiego zachowania – niewymienionego w dokumentacji – jest saturacja wszystkich kanałów w przypadku opromieniowania bardzo silnym sygnałem śledzącym. Zachowanie to znane jest raczej z anegdot pilotów i nie jest ono zamierzone, gdyż powoduje ono utratę świadomości sytuacyjnej. Powodem jego występowania może być szereg czynników, od rozpraszania fal radarowych na strukturze samolotu skutkującego odebraniem ich przez przeciwległe anteny, po niedostateczne wyekranowanie obwodów zasilacza bądź przewodów łączących moduły S3M-1 z modułem S3M-3 znajdującym się w przedziale awioniki. Odtworzenie tego zachowania, jak również warunków, w których występuje, wymagałoby kompleksowej symulacji obejmującej cały samolot, jego sieć elektryczną itp.

Model symulacyjny został sporządzony na potrzeby dowolnego oprogramowania symulatora lotu, jednak przy dostosowaniu go do danej platformy konieczne byłoby nie tylko zdefiniowanie wejść i wyjść oraz wygenerowanie kodu – dostępność danych, na których pracuje RWR zależy bowiem od platformy i może być ona kompletnie inna dla różnych platform. Dlatego o ile logika prezentacji danych jest uniwersalna dla wszystkich potencjalnych platform, o tyle sposób wykrycia detekcji jest całkowicie zależny od platformy i konieczne byłoby zaimplementowanie go od nowa pod daną platformę. W przypadku wykorzystania zkastomizowanych imitatorów opartych o własne mikrokontrolery możliwe może być w przypadku tego systemu – ze względu na prostą logikę prezentacji danych – wykonanie całego przetwarzania danych po stronie imitatora, wtedy od strony oprogramowania symulatora lotu należałoby jedynie przygotować w odpowiedni sposób dane.

Dalsze możliwości rozwoju tego projektu obejmują odtworzenie płyty 1M (automatyczny zrzut środków przeciwdziałania), blokowania wejścia przy pracy własnego radaru przez płytę 3M oraz modułu zasilania na potrzeby złożonych symulacji maszyn z pełną implementacją uzbrojenia oraz anomalii w sieci elektrycznej. Możliwa byłaby też symulacja potencjalnych awarii i anomalii w działaniu systemu, jak również przybliżona symulacja wspomnianej saturacji wszystkich kanałów. Ponadto dla przykładowego zestawu danych wejściowych wykonano (w symulacji uproszczonej) dwuwymiarowe odwzorowanie charakterystyki anten – charakterystyka trójwymiarowa została jednak oszacowana, więc można to działanie na potrzeby symulacji samolotów myśliwskich rozszerzyć o charakterystykę nachylenia, a zamiast płaskiego namiaru podać na wejściu wektor 3D do emitera – pozwoliłoby to na ustalanie przewyższenia emitera poprzez sprawdzenie odbioru w przechyleniu.

Bibliografia

1. *International Electronic Countermeasures Handbook*. Norwood, MA : Artech House, 2004. 9781580538985.
2. *Stacyja Prieduprieżdzenija ob Obłuczenii SPO-10 (Izdielije S3M), Techničeskoje opisanie i instrukcyja po ekspluatácii*. 1976. XA1.090.000 TO.