

**WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI**

KATEDRA ELEKTRONIKI

**PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA**

Syntezer dźwięku w układzie FPGA

Music Synthesizer on FPGA

Autor: Mateusz Dyrdół

Kierunek studiów: Elektronika i Telekomunikacja

Opiekun pracy: dr inż. Jerzy Kasperek

Kraków, 2018

**OŚWIADCZENIE**

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz.631 z późn. zm.):„ Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

……………………………….*podpis dyplomanta*

**Spis treści**

[Wstęp 6](#_Toc501073979)

[Cel pracy 7](#_Toc501073980)

[Rozdział 1 Metody syntezy i rodzaje Syntezatorów 8](#_Toc501073981)

[1.1 Synteza addytywna 8](#_Toc501073982)

[1.2 Synteza subtraktywna 9](#_Toc501073983)

[1.2.1 Blok przetwarzania dźwięku 11](#_Toc501073984)

[1.2.2 Blok modulacji 11](#_Toc501073985)

[1.3 Synteza modulacji częstotliwości 12](#_Toc501073986)

[1.4 Synteza z użyciem próbek 13](#_Toc501073987)

[1.4.1 Synteza z użyciem tabeli przebiegu fali 13](#_Toc501073988)

[1.5 Syntezatory dźwięku 14](#_Toc501073989)

[1.5.1 Syntezatory analogowe 14](#_Toc501073990)

[1.5.2 Syntezatory cyfrowe 16](#_Toc501073991)

[1.5.3 Syntezatory w standardzie Virtual Studio Technology 17](#_Toc501073992)

[Rozdział 2 Interfejsy audio: MIDI i HDMI 20](#_Toc501073993)

[2.1 Interfejs i jego rola w instrumentach muzycznych 20](#_Toc501073994)

[2.2 Interfejs HDMI jako źródło sygnału audio 23](#_Toc501073995)

[2.2.1 Warstwa fizyczna 23](#_Toc501073996)

[2.2.2 Przesyłanie sygnałów i kodowanie 23](#_Toc501073997)

[Rozdział 3 Implementacja syntezera dźwięku w układzie FPGA 24](#_Toc501073998)

[3.1 Opis platformy MAXimator oraz środowiska Intel Quartus 24](#_Toc501073999)

[3.2 Architektura syntezera 26](#_Toc501074000)

[3.3 Bezpośrednia synteza cyfrowa 26](#_Toc501074001)

[3.4 Generacja sygnałów 26](#_Toc501074002)

[3.4.1 Akumulator fazy 26](#_Toc501074003)

[3.4.2 Mikser 26](#_Toc501074004)

[3.5 Interfejs użytkownika 26](#_Toc501074005)

[Podsumowanie i wnioski 30](#_Toc501074006)

[Streszczenie 31](#_Toc501074007)

[Summary 32](#_Toc501074008)

[Słowa kluczowe 33](#_Toc501074009)

[Keywords 34](#_Toc501074010)

[Bibliografia 35](#_Toc501074011)

[Dodatek A Przykład programu komputerowego 36](#_Toc501074012)

[Dodatek B. Spis zawartości dołączonej płyty CD 37](#_Toc501074013)

[Spis ilustracji 38](#_Toc501074014)

[Spis tabel 39](#_Toc501074015)

[Spis stosowanych skrótów 40](#_Toc501074016)

# Wstęp

Syntezator to instrument muzyczny, w którym dźwięk jest generowany i modelowany w układach elektronicznych. Syntezowanie dźwięku obejmuje wytworzenie głównej składowej częstotliwości odpowiedzialnej za [wysokość dźwięku](https://pl.wikipedia.org/wiki/Wysoko%C5%9B%C4%87_d%C5%BAwi%C4%99ku) oraz proporcjonowanie składowych harmonicznych kształtujących barwę. Pierwsze koncepty tworzenia muzyki przy pomocy urządzeń elektrycznych zostały zawarte w pracy „*A Mathematical Theory of Music*” w połowie dwudziestego wieku. Przez kolejne dziesiątki lat, wraz z rozwojem technologii w układach elektronicznych, konstruktorzy rozwijali funkcjonalność urządzeń syntezujących dźwięk. W dzisiejszych czasach cyfrowe syntezatory są tak samo popularne jak ich analogowe odpowiedniki. Z powodu przystępnej ceny oraz szerokiej gamy możliwości, cyfrowe instrumentów są wszechobecne w każdym studiu nagraniowym. Z drugiej strony analogowe syntezatory są uwielbiane przez artystów za ciepłą barwę i pewne niedoskonałości, które nadają unikalne brzmienie, niemożliwe do wytworzenia w cyfrowym instrumencie.

Głównym zastosowaniem syntezatorów w muzyce jest najwierniejsze odtworzenie znanych instrumentów akustycznych lub elektrycznych. Od kilkunastu lat konstruktorzy tych urządzeń oraz producenci muzyczni budują imitacje pozwalające na generacje ścieżek dźwiękowych bez umiejętności grania na skomplikowanych instrumentach takich jak skrzypce czy saksofon. Innym zastosowaniem syntezatorów jest kreowanie nowych, nieznanych dotąd brzmień. W tym zakresie istnieje bardzo duża dowolności i każdy artysta ma możliwość stworzyć bazę własnych tonów, które nadają mu unikatowy znak rozpoznawczy.

Motywacją do stworzenia tego syntezatora jest zapoznanie się z metodami syntezy cyfrowej w nowoczesnych instrumentach elektronicznych oraz stworzenie osobliwego i niepowtarzalnego urządzenia dopasowanego do awangardowych potrzeb użytkownika.

# Cel pracy

Praca inżynierska ma na celu implementację syntezera dźwięku korzystając z zestawu startowego z układem FPGA z rodziny Altera MAX10. Do zaprogramowania układu służy środowisko Intel Quartus Prime. Projekt został wykonany używając języków opisu sprzętu. Praca zawiera informacje o rodzajach syntezatorów ze szczegółowym opisem zalet i wad. Przedstawione zostały rozwiązania w dzisiejszych systemach syntezy cyfrowej. Analiza problemu wraz z uwzględnieniem wstępnie założonych cech produktu skłoniła autora do stworzenia syntezatora w układzie FPGA z wykorzystaniem multimedialnego interfejsu wysokiej rozdzielczości (ang. High Definition Multimedia Interface) do komunikacji z odbiornikiem.

Główną częścią syntezatora jest moduł bezpośredniej syntezy cyfrowej odpowiedzialny za wytworzenie sygnałów z parametru wysokości oraz amplitudy dźwięku przesyłanych w standardzie MIDI. Wybraną metodą syntezy jest metoda tablicowa w oparciu o próbki zawarte w pamięci. Jest to jedno z najnowocześniejszych podejść do syntezy w instrumentach muzycznych rozpowszechnione w większości współczesnych syntezatorów. Wyżej wymienione normy przesyłania sygnałów zostały opisane wraz z wykorzystaniem w projekcie.

Obsługa sprzętu ze strony użytkownika odbywa się przez dołączony ekspander w zestawie MAXimator. Wybór funkcji syntezatora następuje po naciśnięciu przycisków. Wyświetlacze dołączone do płytki zapewniają kontrolę nad syntezatorem wskazując stan instrumentu, w jakim się znajduje.

# Metody syntezy i rodzaje Syntezatorów

Przez lata, wraz z rozwojem przemysłu muzycznego oraz technologii cyfrowej wiele metod syntezy zostało zapoczątkowane. W tym rozdziale zostało przedstawione kilka metod z naciskiem na ich różnice w obliczeniach i zależności matematyczne.

Idealna metoda syntezy powinna:

* być zdolna do produkcji rzeczywistych dźwięków
* z łatwości generować nowatorskie dźwięki
* wymagać niewielką ilość obliczeń
* wymagać niewielką ilość pamięci operacyjnej
* wymagać niewielką ilość pamięci ulotnej

W praktyce te cechy wykluczają się wzajemnie, dobry syntezator z rzeczywistymi dźwiękami potrzebuje dużo obliczeń i pamięci. Przez to producenci tych urządzeń tworzą kilka flagowych syntezatorów, z których każdy ma określone funkcje a ich możliwości generacji tonów są niemal bezgraniczne. Cechy budowy syntezatorów i wybór metody syntezy różni się brzmieniami (nowe, nowatorskie lub rzeczywiste, klasyczne dźwięki) i jego zasobami (obliczenia przez procesor lub zużycie pamięci).

## Synteza addytywna

Synteza addytywna to pierwsza z przedstawianych metod widmowych. Proces syntezy w tych metodach odbywa się poprzez operacje na widmie dźwięku. Każdy sygnał może być wytworzony z sumowania kilku sinusoid z różnymi amplitudami, częstotliwościami i fazą.

Metoda addytywna, w odróżnieniu od metody samplingowej lub tablicowej jest rzadko używana w układach instrumentów elektronicznych. Proces polega na analizie widmowej, najczęściej poprzez transformacje Fouriera. Potem następuje resynteza, czyli budowanie widma dźwięku z pojedynczych harmonicznych, które mogą być modulowane amplitudowo i fazowo. Synteza addytywna ma dwie odmiany. Pierwsza z nich zakłada, że sygnałem poddawanym syntezie jest sygnał okresowy. Polega na ekstrakcji składowych widmowych i liczeniu częstotliwości harmonicznych z dopasowaniem szerokości okna analizy do okresu sygnału. Następnie przeprowadza się resyntezę sygnału. Tworzenie dźwięku w tej metodzie opisuje wzór przedstawiony we wzorze 4.1:

Wadą tej metody jest fakt, że niemożliwe jest wykonanie syntezy dźwięku nieharmonicznego a wartość częstotliwości podstawowej dźwięku jest niezbędna. Druga odmiana metody addytywnej pozwala na syntezę sygnałów harmonicznych. Jest to tzw. metoda MQ od nazwisk badaczy McAulay i Quatieri. Transformacja Fouriera w tej metodzie nie korzysta z dopasowywania szerokości okna do długości okresu. Zamiast transformacji Fouriera możliwe jest również użycie transformacji falkowej. Kolejnym krokiem jest wyszukiwanie lokalnych maksimów i proces resyntezy. Podsumowując ta metoda polega na szukaniu i interpolacji lokalnych maksimów widma. Przez możliwość syntezy nieharmonicznych częstotliwości, ta metoda ma większy zakres stosowalności niż pierwsza odmiana.

## Synteza subtraktywna

Drugim rodzajem syntezy widmowej jest metoda subtraktywna. Polega na odejmowaniu ustalonych składowych widma z szumu lub sygnału szerokopasmowego aż do uzyskania określonej barwy dźwięku. Modelowanie dźwięku odbywa się przez układ filtracyjny. Metoda jest bardzo powszechna w klasycznych syntezatorach analogowych i cyfrowych. Filtrowanie w tym procesie opisuje wzór 4.2.1

Gdzie ak i br – współczynniki filtru,

u(n) – sygnał wejściowy,

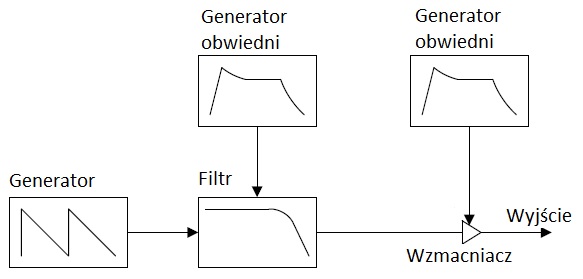
x(n) – n-ta próbka sygnału syntetycznego,

G – wzmocnienie.

Powyższe równanie opisuje model ARMA. Skrót pochodzi od połączenia dwóch terminów autoregresja AR i ruchoma średnia MA. Sygnał wejściowy wytwarza źródło dźwięku, którym w syntezatorze jest najmniej jeden oscylator i generator szumu. W syntezerach analogowych generowany jest zmienny sygnał elektryczny przez oscylator kontrolowany napięciowo (VCO). Dla syntezera analogowych jest możliwe wygenerowanie tylko kilku podstawowych przebiegów. Natomiast w syntezatorach cyfrowych istnieje możliwość wyboru kształtu generowanej fali z dużej liczby przebiegów, których wzorce znajdują się w pamięci instrumentu. Najbardziej spotykane typy przebiegów to:

* przebieg sinusoidalny
* przebieg trójkątny
* przebieg piłokształtny
* przebieg prostokątny

Rożne kształty mają odzwierciedlenie w różnicach harmonicznych, co ma wpływa na barwę dźwięku. Kształt sinusoidy ma bardzo czysty ton i używany jest do tworzenia brzmień o niskich częstotliwościach. Przebieg trójkątny ma gładkie brzmienie a przebieg piłokształtny szorstkie. Przyczyną tego jest zawartość nieparzystych, malejących w amplitudzie prążków w widmie przebiegu trójkątnego. Fala o kształcie piłokształtnym zawiera parzyste i nieparzyste prążki, których amplituda szybko maleje.



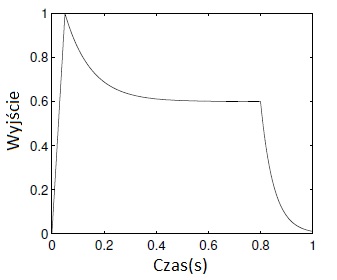
*Rys. 1.2.1 Metoda subtraktywna*

### Blok przetwarzania dźwięku

Oscylatory zwykle produkują proste fale dźwiękowe, które są bogate w harmoniczne, ale również mogą tworzyć bardziej skomplikowane dźwięki. Wysokość dźwięku zależy od granej nuty, ale opcjonalnie może być kontrolowany przez obwiednie lub oscylator niskiej częstotliwości (LFO). Filtry są najczęściej o charakterystyce dolnoprzepustowej z kontrolowanym poziomem rezonansu. Częstotliwość odcięcia jest zwykle zależna od obwiedni. Zdarza się, że więcej niż jeden filtr jest wykorzystywany w drodze syntezy. Zadaniem wzmacniaczy jest zwiększenie mocy sygnału, Wzmacniacz jest kontrolowany przez generator obwiedni (Rys. 4.2.1).

### Blok modulacji

Generator obwiedni wytwarza sygnał modyfikujący niektóre z aspektów dźwięku takich jak amplitudę narastania lub jasność brzmienia. Kształt obwiedni może się różnić, najbardziej popularny jest przedstawiony na Rys 1.2.2.1 nazywany Attack-Decay-Sustain-Release (ADSR).



*Rys 1.2.2.1 Obwiednia ADSR*

Na ogół wzmacniacz i filtr mają osoby generator obwiedni, choć możliwe jest występowanie dodatkowego generatora do kontroli np. wysokość tonu. Oscylatorem niskiej częstotliwości nazywamy każdy oscylator, który generuje bardzo niskie częstotliwości I jest używany do kontroli parametrów syntezatora. Zazwyczaj są używane do tworzenia efektu vibrato lub do wolnej zmiany barwy brzmienia. Oscylator niskiej częstotliwości zwykle ma kształt sinusoidy lub trójkąta.

## Synteza modulacji częstotliwości

Technika syntezy metoda modulacji częstotliwości nadaje się do tworzenia dźwięków harmonicznych jak i nieharmonicznych. W tej metodzie korzysta się z zestawu kilku oscylatorów, często nazywany operatorami spełniają role funkcji nośnej i modulującej. W przeciwieństwie do modulacji FM, jaką znamy z zastosowania w radiach, w syntezie FM fala nośna i modulującą są podobnej wielkości. Dla częstotliwości modulującej niższej niż 20Hz efektem są periodyczne zmiany wysokości dźwięku, podobne jak przy użyciu LFO. Przy większych częstotliwością modulujących słyszalnym efektem jest zmiana barwy syntetyzowanego brzmienia. Pojedynczy operator składa się z:

* Generatora
* Wzmacniacza
* Generatora obwiedni

Sygnał syntetyczny można opisać wzorem:

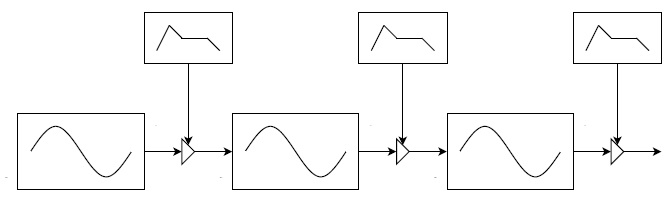
Gdzie A(n)– amplituda sygnału,

I(n) – indeks modulacji,

fc – częstotliwość nośna,

fm – częstotliwość modulująca,

T – okres próbkowania



*Rys 1.3.1 Blok syntezy FM*

Przez niskie wymagania obliczeń metody FM, wielu dystrybutorów instrumentów elektronicznych zaczęło wydawać produkty o osobliwych tonach. Najbardziej popularnym był syntezator Yamaha DX-7, które brzemiennie opisywano, jako zimne i bezosobowe. Wraz z wygaśnięciem patentu w 1995r. synteza FM stała się wszechobecna w nowoczesnych syntezatorach.



*Rys 1.3.2 Yamaha DX-7*

## Synteza z użyciem próbek

Zasada działania tej metody polega na odtwarzaniu jednej próbki. Użytkownik może sam rejestrować dowolne dźwięki naturalne, a dodatkowo kształtować parametry związane ze sposobem odtwarzania zarejestrowanych uprzednio dźwięków. Przy pętli jednokierunkowej stosuje się efekt vibrato do eliminacji słyszalnych zapętleń. Do otrzymania rzeczywistych dźwięków w syntezatorach z użyciem próbki, korzysta się z interpolacji wielomianowej lub interpolacji sygnałem sinusa kardynalnego. Samplowanie wytwarza dźwięk w bardzo dobrej jakości o ile próbka jest odpowiednio długa. Ta zaleta powiązana z niskim kosztem pamięci pozwoliła się wybić syntezatorom na rynkach światowych.

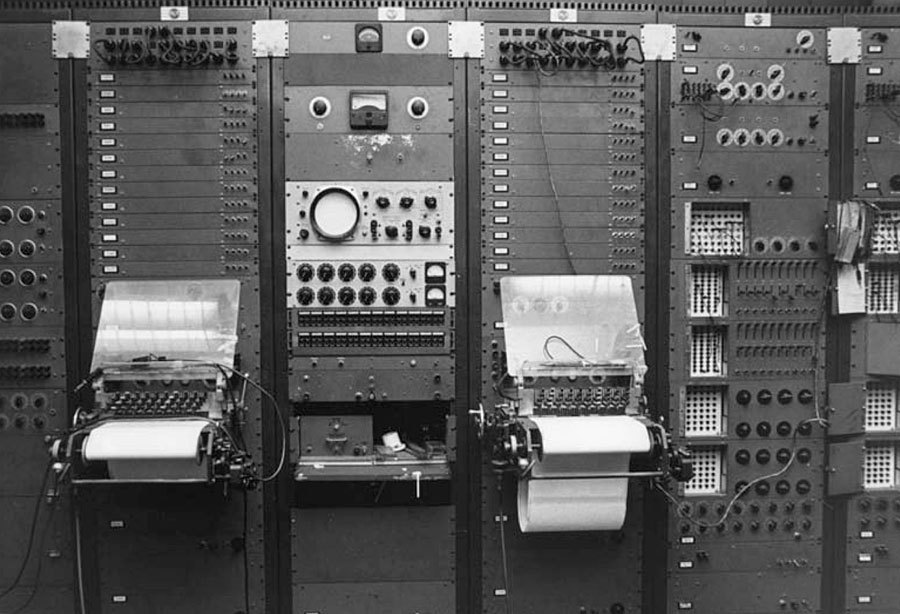
### Synteza z użyciem tabeli przebiegu fali

W syntezie tablicowej dźwięki instrumentów naturalnych są próbkowane i zapisywane w postaci tablicy przez producenta syntezatora. Zapisane próbki są odtwarzane określonym algorytmem i przetwarzane na postać analogową. Ta metoda zyskała tak duża popularność jak metoda subtraktywna. Zaletami w stosunku do metody subtraktywna jest większa różnorodność sygnałów dostępnych w generatorze, możliwości dynamicznej zmiany barwy brzmienia i stabilna wysokość dźwięku. Jedynym problemem było zjawisko aliasingu. Wiele cyfrowych i wirtualnych syntezatorów korzysta z tej metody ze względu na wierne odtworzenie kształtów fal i może być zmieniana w czasie bez zniekształceń. Przykładem użycia tej metody jest syntezator wirtualny Xfer Serum wymieniony w punkcie 1.5.3. Ta metoda rózni się od syntezy z uzycie próbek gdyż każdy dźwięk jest na nowo generowany przez układ elektroniczny każda tablica reprezentuje tylko jeden okres fali.

## Syntezatory dźwięku

### Syntezatory analogowe

Pierwszym typem muzycznych instrumentów wykorzystujących syntezę w układach elektronicznych jest syntezator analogowy. Synteza analogowa w swojej naturze jest bardzo prosta i każdy syntezator korzysta z tej samej metody. Stosowane są w niej dwa lub trzy oscylatory, które wytwarzają okresowe przebiegi o charakterystycznym kształcie dla wybranej częstotliwości. Wysokość dźwięku oraz kształt generowanej jest wybierana przez użytkownika. Przed zsumowaniem tych oscylatorów, każdy z parametrów danej fali może zostać zmieniony; poddany modulacji, przesterowaniu, obniżeniu lub podwyższeniu wysokości dźwięku. Pierwsze analogowe syntezatory to RCA MkI i MkII (Rys. 5.1.1) miały odpowiednio 12 i 24 oscylatory a kod dźwięku był rejestrowany na taśmie perforowanej. Generowany dźwięk był zapisywany na płycie lub odtwarzany przez głośnik po jego wzmocnieniu.



*Rys 5.1.1 Syntezatory RCA MkI i MkII.*

Pionierem instrumentów elektronicznych do celów komercyjnych był Robert Moog. W latach sześćdziesiątych XX wieku muzycy rockowi i awangardowi używali jego syntezatorów na całym świecie między innymi: The Beatles, The Rolling Stones. Początkowo instrumenty te były modułowe, zajmowały całe szafy a elementy były łączone przewodami. Następstwem tego było w 1971 Moog zaprezentowanie nowego urządzenie Minimoog Model D, który zawierał najważniejsze części z poprzednich modeli modularnych i był w pełni przenośny. Do dzisiaj ten model jest jednym z najbardziej cenionych syntezatorów analogowych.



*Rys 5.1.2 Minimoog Model D*

W pierwszej połowie lat siedemdziesiątych syntezatory stał się głównym instrumentem w muzyce rockowej na równi z gitarą. Instrumentaliści korzystający z tych urządzeń otaczali się coraz większą ilością instrumentów będących ze swej natury sporych rozmiarów. W ten sposób powstały tzw. „ściany” (ang. *wall of synthesizers*) wokół artysty, który znajdował się otoczony kilkoma lub nawet kilkunastoma klawiaturamisyntezatorów. Stało się to bardzo niepraktyczne, dlatego nastąpiła konieczność standaryzacji instrumentów, tak by mogły być sterowane z klasycznej klawiatury. Ten powstał standardowy interfejs MIDI.

**

*Rys. 5.1.3 Ściana syntezatorów*

### Syntezatory cyfrowe

Syntezatory cyfrowe początkowo zostały przyjęte nieufnie przez artystów ze względu na ich nowatorskie rozwiązania, wkrótce jednak zdominowały rynek muzyczny. Okazały się równie elastyczne możliwościami generacji dźwięku, jak ich analogowe odpowiedniki. Oprócz tego instrumenty miały wbudowane biblioteki brzmień imitujących instrumenty akustyczne oraz dźwięki syntezatorowe, co spowodowało wzrost zainteresowania tymi instrumentami przez eksperymentujących artystów. Ze wzrostem postępu technologicznego w układach elektronicznych syntezatory cyfrowe stawały się znacznie mniejsze, ich funkcjonalność i jakość dźwięku ogromnie wzrosła a cena malała. W latach osiemdziesiątych stały się tańsze i bardziej dostępne dla każdego człowieka. W następnych latach cyfrowy syntezator był nieodłączną częścią zespołów rockowych i popowych. Obecnie instrumenty elektroniczne wyposażone w dynamiczną klawiaturę, bank brzmień i wiele gadżetów są powszechnie dostępne za przystępną cenę zależną od funkcjonalności i wyglądu.

Syntezatory cyfrowe w obecnych czasach często generowane są przez narzędzia: PureData, jMAX, MAX/MSP czy CPS, które mają świetną elastyczność w tworzeniu metod syntezy. W tych instrumentach obliczenia są wykonywane przez mikroprocesory i syntezatory mogą wytworzyć dosłownie każdy rodzaj dźwięku wybierając metodę przez nowoczesny i przejrzysty graficzny interfejs użytkownika. Producenci cyfrowych syntezatorów w celu zwiększenia nabywców dodają analogowe komponenty do instrumentów takie jak filtry czy pętle LFO.



*Rys. 5.2.1 Syntezator cyfrowy Novation Mininova*

### Syntezatory w standardzie Virtual Studio Technology

Virtual Studio Technology jest standardem wtyczek wprowadzanym w 1996 r. przez firmę Steinberg Media Technologies. Stworzony w ten sposób syntezator istnieje tylko, jako oprogramowanie. Do obsługi oprogramowania VST niezbędny jest program bazowy nazywanym Digital Audio Workstation, które symuluje tworzenie i edycję sygnałów dźwiękowych. Instrumenty VST maja własny zintegrowany interfejs wraz z możliwością podłączenia klawiatury MIDI, co daje możliwość na obsługę i zmianę parametrów w czasie rzeczywistym. Standard VST jest możliwy do wykorzystania w nieodpłatnej licencji dla aplikacji. Ten fakt spowodował duża popularność tych instrumentów wśród producentów muzycznych ze względu na brak potrzeby przenoszenia dużych syntezatorów oraz podobne wyniki w porównaniu z ich fizycznymi wersjami. W ostatnich latach większość dystrybutorów syntezatorów analogowych jak i cyfrowych, tworzy wersję tych instrumentów w standardzie VST zwiększając tym bogatość prezentowanej oferty. Najbardziej popularne instrumenty VST to: Xfer Serum, LennarDigital Sylenth1, Native Instruments Massive, reFX Nexus 2. Wszystkie te wtyczki są duża częścią dzisiejszej muzyki elektronicznej. Ich prostota a także ogromna ilość możliwych kombinacji w połączniu z wygodą użytkownika sprawia ze te instrumenty powoli zastępują wszystkie klasyczne syntezatory.



*Rys. 5.3.1 Arturia Minimoog V, wirtualny odpowiednik instrumentu Minimoog*



*Rys 5.3.2 Xfer Serum, jedna z najbardziej popularnych wtyczek VST na rynku*

# Interfejsy audio: MIDI i HDMI

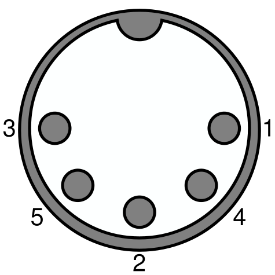
## Interfejs i jego rola w instrumentach muzycznych

Na początku lat osiemdziesiątych poprzedniego wieku urządzenia muzyczne zaczęły być coraz bardziej popularne. Powstawały lepsze i nowsze instrumenty, których w żaden sposób nie można było połączyć. Zrodziła się potrzeba kontrolowania kilku urządzeń na podstawie granych melodii, ich wysokości czy ekspresji. Postanowiono ujednolicić system komunikacji, który będzie dostępny dla każdego producenta i urządzenia różnych marek będą mogły ze sobą współpracować. W taki sposób kilka syntezatorów, samplerów może współdzielić sygnał zegarowy, grać te same dźwięki i tworzyć całe kompozycje muzyczne w czasie rzeczywistym. Powstał tak interfejs komunikacyjny, który otrzymał nazwę Musical Instrument Digital Interface. Skutkiem wprowadzenia nowego standardu było pojawienie się odpowiednich gniazd w instrumentach. Wykorzystano już wcześniej używane do łączenia sprzętu muzycznego – złącze DIN 5 (Rys. 6.1).



*Rys. 6.1 Gniazdo i wtyczka DIN 5*

W 5-bolcowym gnieździe przewidziano, że wyprowadzenia o numerach **5** i **4** przeznaczone są do podłączenia pętli prądowej. Wyprowadzenie o numerze **2** przeznaczone jest do połączenia mas poszczególnych urządzeń. Wyprowadzenie numer **1** przeznaczone jest do sterowania pracą urządzeń (start/stop). Wyprowadzenie numer **3** służy do przesyłania sygnału taktującego (24 "uderzenia" na ćwierćnutę).

**

*Rys. 6.2 Numeracja wyjść gniazda DIN 5*

W systemie MIDI wyróżniamy trzy rodzaje gniazd:

* MIDI IN – wejście MIDI
* MIDI OUT – wyjście MIDI
* MIDI THRU – przejście przenoszące sygnał z wejścia bez zmian

Syntezatory produkowane w dzisiejszych czasach komunikują się z komputerem przez standard USB. Nie wyklucza to zastosowywania MIDI. Stare syntezatory są nadal używane przez artystów i muzyczny interfejs umożliwia stałe komponowanie na tych urządzeniach. Proste interfejsy MIDI (Rys. 6.2) oraz różnorodne zewnętrzne karty dźwiękowe są najlepszym sposobem na rozszerzenie funkcjonalności instrumentów elektronicznych.

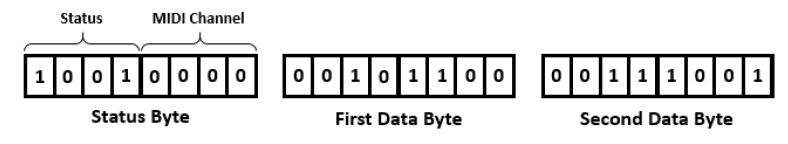


*Rys. 6.3 Interfejs MIDI Prodipe 4I4O*

Należy pamiętać, że w sygnał w standardzie MIDI przesyła jedynie wiadomości i instrukcje do instrumentów muzycznych a dźwięk jest generowany przez te instrumenty. Komunikacja w systemie MIDI może odbywać się na 16 oddzielnych kanałach z prędkością 31250 bitów na sekundę. Jedna ramka tego sygnału ma 3 bajty. Pierwszy bajt to tzw. „status byte”, który definiuje instrukcję, jaką ma wykonać instrument oraz kanał MIDI. Kolejne dwa bajty oznaczają wartości dla danego trybu pracy i różnią się w zależności od instrukcji. Dla niektórych z wiadomości jest przesyłany tylko bajt statusu np. żądanie strojenia, reset systemu. Kilka z instrukcji zawartych w najstarszym bajcie:

* Note ON – 0x9X – oznacza naciśniecie klawisza
* Note OFF – 0x8X – oznacza puszczenie klawisza
* Aftertouch – 0xAX – miara jak mocno został naciśnięty klawisz
* Control Change – 0xBX – związany jest z urządzeniami sterującymi

(np. modulatorami)



*Rys. 6.4 Ramka MIDI*

Kanały w MIDI odgrywają taką samą rolę jak kanały w telewizorze podłączonym do sieci kablowej – na każdym można przesłać inną informację. Mając telewizor z podglądem wielu kanałów, można oglądać wiele kanałów jednocześnie. Odpowiednikiem takiego telewizora z możliwością równorzędnego podglądu wielu kanałów jest w świecie MIDI syntezator (lub moduł czy sampler). W przypadku MIDI pojedynczym kablem lub za pośrednictwem wirtualnego portu MIDI można przesłać do 16 kanałów, z których każdy zawiera inną treść, czyli opisuje, co ma grać dany instrument zarówno w sferze pojedynczych dźwięków jak i całych akordów. Zadaniem użytkownika jest określenie tych samych kanałów po stronie odbiorczej i nadawczej. Kanał, którym przesyłamy informacje o grze perkusji, powinien sterować tym blokiem syntezatora lub samplera, który odpowiada za odtwarzanie dźwięków perkusji, a nie np. fortepianu. Chcąc w swej aranżacji wykorzystać więcej niż 16 instrumentów, należy skorzystać z dodatkowego portu MIDI. W świecie fizycznym jest to dodatkowe gniazdo MIDI, a w świecie wirtualnym kolejny port, którego nazwę można znaleźć w opcjach ustawień sekwencera i programowego syntezatora/samplera. Chcąc za pośrednictwem MIDI odtwarzać partię, do wykonania, której potrzebne są 64 instrumenty, należy dysponować czterema portami MIDI – zarówno po stronie sterowania jak i odtwarzania. Coraz więcej współcześnie produkowanych instrumentów wyposażonych jest w interfejs USB, który pozwala na transmisję znacznie większej liczby kanałów za pośrednictwem jednego kabla, bez kłopotliwych wielokrotnych połączeń. USB ma jednak rację bytu w przypadku transmisji do i z komputera; jeśli chcemy podłączyć klawiaturę sterującą ze sprzętowym modułem lub syntezatorem, to w dalszym ciągu będziemy potrzebować kabli i gniazd MIDI.

Synchronizacja jest jedną z najważniejszych cech współpracy urządzeń komunikujących się w protokole MIDI. Najprostszą jej formą jest synchronizacja MIDI Sync. Polega na przesyłaniu pojedynczych wiadomości takich jak: Start, Stop, Continue, Song Position Pointer między urządzeniami. Jeżeli zachodzi potrzeba synchronizacji dźwięku i obrazu to można również skorzystać z innego typu: MIDI Time Code.

Specyfikacja standardu MIDI dołącza schemat połączenia z portem szeregowym UART (Rys. 5.4). Jest to przydatna dla wszystkich projektantów, który mają zamiar wykorzystać przesyłanie danych w swoich urządzeniach.

Syntezator, który jest obiektem tej pracy, reaguje tylko na wiadomości o naciśnięciu i puszczeniu klawisza gdyż nie ma potrzebny interpretowania innych przesyłanych pakietów przez kanał MIDI ze względu na funkcjonalność instrumentu.

## Interfejs HDMI jako źródło sygnału audio

### Warstwa fizyczna

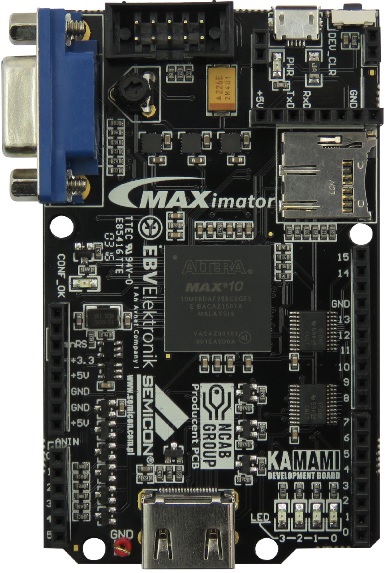
### Przesyłanie sygnałów i kodowanie

# Implementacja syntezera dźwięku w układzie FPGA

## Opis platformy MAXimator oraz środowiska Intel Quartus

Układ FPGA na płytce MAXimator (Rys. 3.1) jest świetnym rozwiązaniem nie tylko dla poczatkujących elektroników, ale również dla profesjonalistów i hobbystów. Cechuje się nowoczesnym układem firmy Altera, należącym do rodziny MAX10 o dużych zasobach logicznych. Najważniejsze cechy dostępne dla użytkownika to:

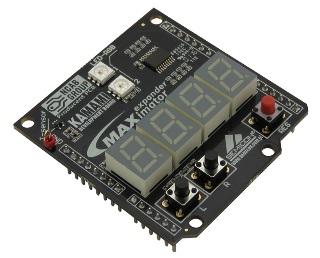
* ponad 8000 komórek LE
* 378kb konfigurowalnej pamięci
* 1376kb wewnętrznej pamięci Flash dla aplikacji
* wbudowany 12-bitowy przetwornik A/C 1MSpS
* wewnętrzny generator sygnału zegarowego
* 2 wewnętrzne wielokanałowe syntezery PLL



*Rys. 3.1 Wygląd płytki bazowej MAXimator*

Zalety układów MAX10 są bardzo dobrze wyeksponowane w zestawie MAXimator. Budowa płytki konstrukcyjnie przypomina Arduino Uno Rev.3 co pozwala na różnorodne zastosowanie, również w celach edukacyjnych. W skład zestawu MAXimator wchodzą:

* Płytka MAXimator z układem 10M08
* Programator zgodny z USB Blaster
* Ekspander z 4-cyfrowym wyświetlaczem LED, analogowym sensorem temperatury, trzema przyciski i dwiema diodami LED RGB



*Rys. 3.2 USB Blaster*

*Rys. 3.3 Wygląd płytki bazowej MAXimator*

W odróżnieniu od zestawów Arduino, MAXimator nie ma wbudowanego programatora, lecz korzysta z dołączonego do zestawu USB Blastera (Rys. 3.2), który pozwala na zaprogramowanie dostarczonego układu naszym kodem przez środowisko Quartus Prime. Kolejną atrakcją zestawu jest ekspander (Rys. 3.3) mający szeroką gamę funkcjonalności dla projektantów. Wyposażony w cztero-pozycyjny, siedmio- segmentowy wyświetlacz LED sterowany multipleksowo, dwie diody RGB, czujnik temperatury oraz trzy przyciski: jeden przycisk *RESET* a pozostałe dwa do dowolnego wykorzystania przez użytkownika.

Firma Altera opracowała własne środowisko przeznaczone do implementacji projektów wykorzystujących produkty tej firmy. Oprogramowanie to nosi nazwę Quartus Prime jest dostępne w trzech wersjach: wersja Lite – dostępna bezpłatnie oraz wersje Standard i Pro dostępne komercyjnie. Na potrzeby edukacyjne wystarczającą jest wersja Lite, która wspiera programistów, oferując bogatą gamę predefiniowanych elementów bibliotecznych kompatybilnych z posiadanym układem. Kolejną zaletą programu jest bezpośredni dostęp do rozwiązań ewentualnych błędów w czasie budowania naszego projektu. Jednym kliknięciem myszy jesteśmy kierowani na forum dystrybutora, gdzie wykwalifikowani pracownicy udzielają nam rzetelniej i profesjonalnej pomocy.

Quartus Prime daje nam możliwość wykonania projektu używając edytora schematów lub implementując kod w języku opisu sprzętu. Dla obu podejść projektowych wszystkie elementy biblioteczne są dostępne z adaptacją do własnych potrzeb. Do całkowitej pracy nad rozwojem modułów oraz testowania ich niezbędny jest symulator ModelSIM Altera Edition. Ten oto program dołączony do pakietu Quartus Prime pozwala na wygenerowanie przebiegów czasowych dla wcześniej przygotowanego testbenchu. Podsumowując, cały zestaw sprzętowy jak i oprogramowanie pochodzi od tego samego dystrybutora, co w wyniku daje bezproblemową i efektywną pracę.

## Architektura syntezera

## Bezpośrednia synteza cyfrowa

## Generacja sygnałów

### Akumulator fazy

### Mikser

## Interfejs użytkownika

# Podsumowanie i wnioski

Dyskusja nad dalszym rozwojem pracy. Wnioski. Omówienie wyników. Co zrobiono w pracy i jakie uzyskano wyniki? Czy i w jakim zakresie praca stanowi nowe ujęcie problemu? Sposób wykorzystania pracy (publikacja, udostępnienie instytucjom, materiał źródłowy dla studentów). Co uważa autor za własne osiągnięcia? Jakie umiejętności i wiedzę posiadł autor w trakcie pisania pracy? (około 1 strona).

# Streszczenie

W tym miejscu należy umieścić streszczenie pracy w języku polskim. Streszczenie to powinno mieć objętość 150-200 słów.

# Summary

Here a summary written in English should be placed. This summary should contain 150-200 words.

# Słowa kluczowe

* praca inżynierska,
* szablon,
* procesor tekstu,
* edycja tekstu,
* stosowanie styli.

# Keywords

* engineering thesis,
* template,
* word processor
* document editing,
* using templates.

# Bibliografia

1. Amborski K., *Teoria sterowania*, Warszawa: PWN, 1987. str. 80-100
2. Aplevich J.D., *Direct computation of canonical forms for linear systems by elementary matrix operations*, IEEE Trans. On Autonom. Contr, 1974, vol. AC-9
3. Gregor B., Markteting, w Piasecki B.(red), *Ekonomika i zarządzanie małą firmą*, Warszawe:PWE, 2003, str 55
4. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L., *Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems*, (in Polish), Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1997.
5. Rutkowska D., *Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning*, Springer-Verlag Company, 2001.
6. Rutkowski L., Scherer R., *Nowe struktury rozmyto-neuronowe*, XIV Krajowa Konferencja Automatyki, KKA’02, Zielona Góra, 2002.
7. Nowicki R., Scherer R., Rutkowski L., *A Method For Learning Of Hierarchical Fuzzy Systems*, in: Intelligent Technologies – Theory and Applications, Eds. P. Sincak et al, IOS Press, Amsterdam 2002, pp. 124-129.
8. *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2003r*, Rocznik Statystyczny Przemysłu, GUS Warszawa 2004 tabela 1 str. 2
9. Cisco Systems, [*Dynamic ISL (DISL)*](file:///C:\Users\Fysek\Downloads\Dynamic%20ISL%20(DISL)%20-%20Cisco%20Systems.htm), <http://www.cisco.com/en/US/tech/tk389/tk390/tk162/tech_protocol_home.html>, stan na dzień: 20.12.2004
10. Rzeczpospolita, [*Nafta Polska chce przygotować rekomendację co do prywatyzacji PKN Orlen do czerwca*](file:///C:\Users\Fysek\Downloads\Serwis%20Ekonomiczny1.htm)*,* <http://www.rzeczpospolita.pl/ekonomia/index.html?of=4&al>*, stan na dzień: 20.12.2004*

# Dodatek A Przykład programu komputerowego

# Dodatek B. Spis zawartości dołączonej płyty CD

Praca

imię\_nazwisko\_nr\_albumu.doc – Tekst pracy zapisany w formacie MS Word,

imię\_nazwisko\_nr\_albumu.rtf – Tekst pracy zapisany w formacie rozszerzonym,

www – Zapisane kompletne strony sieci WEB użyte jako bibliografia,

symulator – Aplikacja symulatora satelity LEO wraz z kodem źródłowym.

# Spis ilustracji

Rys. 1 Sugerowana konfiguracja grupy opcji „Widok” 10

Rys. 2 Sugerowana konfiguracja grupy opcji „Zapisywanie” 10

Rys. 3 Przykładowy rysunek 13

Rys. 4 Jak wstawiać odsyłacze do literatury 14

Rys. 5 Przykład poprawnego opisu płyty CD/DVD 15

# Spis tabel

Tabela 1 Wyniki symulacji 13

# Spis stosowanych skrótów

BOR – Biuro Ochrony Rządu,

FBI – (ang. *Federal Bureau of Investigation*) Federalne Biuro Śledcze,

KMSI – Katedra Metod Sztucznej Inteligencji,

NSA – Naczelny Sąd Administracyjny.