

**WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI**

KATEDRA ELEKTRONIKI

**PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA**

Scalony system sterowania windą

ASIC for lift control

Autor: Mateusz Dyrdół

Kierunek studiów: Elektronika i Telekomunikacja

Opiekun pracy: prof. dr hab. inż. Andrzej Kos

Kraków, 2019

**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 5](#_Toc9359596)

[Cel pracy 6](#_Toc9359597)

[Rozdział 1 Technologia 7](#_Toc9359598)

[1.1 Synteza addytywna 7](#_Toc9359599)

[1.2 Synteza subtraktywna 8](#_Toc9359600)

[1.2.1 Blok przetwarzania dźwięku 10](#_Toc9359601)

[1.2.2 Blok modulacji 10](#_Toc9359602)

[1.3 Synteza modulacji częstotliwości 11](#_Toc9359603)

[1.4 Synteza z użyciem próbek 12](#_Toc9359604)

[1.4.1 Synteza z użyciem tabeli przebiegu fali 12](#_Toc9359605)

[1.5 Syntezatory dźwięku 13](#_Toc9359606)

[1.5.1 Syntezatory analogowe 13](#_Toc9359607)

[1.5.2 Syntezatory cyfrowe 15](#_Toc9359608)

[1.5.3 Syntezatory w standardzie Virtual Studio Technology 16](#_Toc9359609)

[Rozdział 2 Opis algorytmu w języku Verilog 19](#_Toc9359610)

[2.1 Tworzenie modułów z wykorzystaniem języka Verilog 19](#_Toc9359611)

[2.2 Feature-driven development 19](#_Toc9359612)

[Rozdział 3 Projektowanie układu scalonego 24](#_Toc9359613)

[3.1 Opis platformy MAXimator oraz środowiska Intel Quartus 24](#_Toc9359614)

[3.2 Architektura syntezera 27](#_Toc9359615)

[3.3 Dekoder ramki MIDI 27](#_Toc9359616)

[3.4 Bezpośrednia synteza cyfrowa 29](#_Toc9359617)

[3.5 Generacja sygnałów 30](#_Toc9359618)

[3.5.1 Zegar referencyjny 30](#_Toc9359619)

[3.5.2 Akumulator fazy 30](#_Toc9359620)

[3.5.3 Tablica z próbkami 33](#_Toc9359621)

[3.5.4 Mikser 34](#_Toc9359622)

[3.6 Interfejs użytkownika 35](#_Toc9359623)

[3.7 Dźwięk w programie Audacity 35](#_Toc9359624)

[Podsumowanie i wnioski 37](#_Toc9359625)

[Streszczenie 38](#_Toc9359626)

[Summary 39](#_Toc9359627)

[Spis stosowanych skrótów 40](#_Toc9359628)

[Słowa kluczowe 41](#_Toc9359629)

[Keywords 42](#_Toc9359630)

[Bibliografia 43](#_Toc9359631)

[Dodatek A. Schemat połączenia MIDI z portem szeregowym UART 44](#_Toc9359632)

[Dodatek B. Spis zawartości dołączonej płyty CD 45](#_Toc9359633)

[Spis ilustracji 46](#_Toc9359634)

[Spis tabel 47](#_Toc9359635)

# Wstęp

# Cel pracy

Praca magisterska ma na celu przedstawienie algorytmu sterowania windą i jego realizację jako układ scalony. Opis behawioralny układu cyfrowego został w języku opisu sprzętu Verilog. Sterownik bazuje na automacie skończonym, gdzie poszczególne stany są instrukcjami wykonywanymi przez windę.

Podstawowym kwestią do rozważenia w pierwszym etapie pracy jest wybranie optymalnego rozwiązania ruchu dźwigu. Główną inspiracją do opisania algorytmu jest obserwacja istniejących rozwiązań oraz usprawnienie ich działania. System musi być przyjazny dla użytkownika, sterowanie będzie odbywać się przyciskami wewnątrz i na zewnątrz windy. Kolejnym ważnym aspektem przy projektowaniu systemu sterowania winda jest energooszczędność. Szacuje się ze w niskich budynkach mieszkalnych winda jeździ sporadycznie - poniżej **5% czasu dobowego**[[1]](#footnote-1).

# Technologia dźwigów osobowych

Nowoczesne windy zostały opracowane w XIX wieku. Te surowe windy powoli ewoluowały od napędzanej parą do mocy hydraulicznej. Pierwsze hydrauliczne dźwigi zostały zaprojektowane z wykorzystaniem ciśnienia wody jako źródła energii. Technologia silnika i metody sterowania ewoluowały szybko, a elektryczność szybko stała się akceptowanym źródłem energii. Pierwsza elektryczna winda została zbudowana przez niemieckiego wynalazcę Wenera Von Siemensa w 1880 roku. W dzisiejszych czasach nowoczesne budynki komercyjne zwykle mają wiele wind z ujednoliconym systemem sterowania.

//TODO rodzaje

## Algorytm SCAN

Dostęp do danych na dysków twardym odbywa się w ruchu uporządkowanym. Nadejście nowego żądania, gdy napęd jest w stanie bezczynności, zapoczątkowuje ruch ramienia w kierunku cylindra, w którym przechowywane są dane, zarówno w, jak i na zewnątrz. Dodatkowe polecenia są obsługiwane tylko w bieżącym kierunku ruchu ramienia, aż ramię osiągnie krawędź dysku. kierunek ramienia odwraca się, a żądania pozostające w przeciwnym kierunku są obsługiwane. Cykl jest powtarzany, aż wszystkie aktywnych polecenia są wykonane. Jest to opis algorytmu SCAN nazywanego również *algorytmem windy.*

Dysk twardy znacząco różni się od dźwigu osobowego. Ważne jest by zestaw tych instrukcji odnieść do działania projektowanego algorytmu windy. Najważniejszą cechą jest utrzymanie kierunku. Winda powinna się zatrzymywać na piętrach, których żądania są zgodne z obecnym kierunkiem ruchu. Jeśli istnieją inne polecenia (kierunek przeciwny), kierunek będzie zmieniony po ustalonym czasie. Ostatecznie, jeśli brak jakichkolwiek żądań, winda będzie w stanie bezczynności.

## 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 1.2.1

Gdzie ak i br – współczynniki filtru,

u(n) – sygnał wejściowy,

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

G – wzmocnienie.

### 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. 1-2).

### 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 rysunku 1-2 nazywany Attack-Decay-Sustain-Release (ADSR).

## Normy??

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

Przez niskie wymagania obliczeń metody FM, wielu dystrybutorów instrumentów elektronicznych zaczęło wydawać produkty o osobliwych tonach. Najbardziej popularnym był syntezator Yamaha DX-7 (Rys. 1-4), którego brzmienie opisywano, jako zimne i bezosobowe. Wraz z wygaśnięciem patentu w 1995r. synteza FM stała się

## 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 dużą popularność jak metoda subtraktywna. Zaletami w stosunku do metody subtraktywnej 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 różni się od syntezy z użyciem próbek gdyż każdy dźwięk jest na nowo generowany przez układ elektroniczny a każda tablica reprezentuje tylko jeden okres fali.

## PLC a ASIC

### 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

(Rys

### 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

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.

### 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 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, że te instrumenty powoli zastępują wszystkie klasyczne syntezatory.

# Opis algorytmu w języku Verilog

## Tworzenie modułów z wykorzystaniem języka Verilog

Język Verilog HDL zawiera funkcje opisujące charakter projektu, przepływ danych, skład strukturalny, opóźnienia i mechanizm generowania przebiegów, w tym aspekty monitorowania odpowiedzi i weryfikacji, wszystkie modelowane przy użyciu jednego języka. Ponadto język zapewnia interfejs języka programowania, dzięki któremu można uzyskać dostęp do elementów wewnętrznych projektu podczas symulacji, w tym do sterowania przebiegiem symulacji. Język nie tylko definiuje składnię, ale także definiuje bardzo jasną semantykę symulacji dla każdego konstruktu językowego. Dlatego modele napisane w tym języku można zweryfikować za pomocą symulatora Verilog. Język dziedziczy wiele symboli operatora i konstruktów z języka programowania C. Verilog HDL zapewnia szeroki zakres możliwości modelowania, z których niektóre są dość trudne do zrozumienia na początku. Jednak podstawowy podzbiór języka jest łatwy do opanowania i użycia. Jest to wystarczające do modelowania większości aplikacji.

Narzedia???

## Feature-driven development

## Testy

Na początku lat osiemdziesiątych poprzedniego wieku zaczęły być coraz bardziej popularne elektroniczne urządzenia muzyczne. 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. 2-1).

# Projektowanie układu scalonego

## Generacja

Zestaw uruchomieniowy 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.

*Rysunek 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.

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.

Uruchomienie projektu na płycie MAXimator wymaga przyporządkowania odpowiednich pinów dla wejść i wyjść zawartych w głównym komponencie. W środowisku Intel Quartus Prime znajduje się narzędzie *Pin Planner,* które w szybki sposób pozwala na wybranie pinów do naszego nadrzędnego. Opis przypisanych wyprowadzeń do sygnałów w syntezatorze przedstawiono w tabeli poniżej:

## Synteza

Cały projekt jest przystosowany do współczesnych standardów wraz z funkcją obsługi przez użytkownika. Syntezer składa się z:

* dekodera MIDI,
* sterownika oscylatorów,
* dwóch oscylatorów,
* miksera sygnałów,
* obsługi interfejsu użytkownika.

Schemat blokowy architektury projektu widnieje na rysunku 3.2.1. Wszystkie komponenty są sterowane narastającym zboczem zegara oraz negatywnym stanem resetu. Weryfikacja poprawnej działalności modułów następuje przez symulator ModelSIM Altera.

*Rysunek 3‑4 Architektura syntezera*

Rozwój architektury odbywał się na równoległym poziomie z testowaniem zaimplementowanych funkcji. W czasie tworzenia cyfrowego syntezatora opartego na DDS jedyną trudność sprawiła implementacja akumulatora fazy i zrozumienie jego działania.

## Tworzenie layoutu

Korzystanie z interfejsu MIDI jest praktycznym zabiegiem dla współczesnych syntezatorów. W implementacji, dekoder MIDI otrzymuje wejściową ramkę i przesyła dwie informacje: start dźwięku od danym tonie i stop dźwięku. Blok dekodera został przedstawiony na rysunku 3-5.

Po przesłaniu wiadomości o charakterystyce danego tonu, następuje zamiana tej wartości na oczekiwaną częstotliwość wygenerowaną przez oscylator. Dokładność generatora jest wymagana by wytworzyć czyste brzmienie. Zastosowanie akumulatora fazy o wysokiej rozdzielczości pozwala na osiągnięcie najlepszej jakości generowanej fali. Fragment tabeli częstotliwości dla piątej oktawy został przedstawiony w tabeli 2.

*Tabela 2 Tablica częstotliwości dla piątej oktawy*

Do obliczenia całkowitej tablicy częstotliwości można posłużyć się wzorem:

## Bezpośrednia synteza cyfrowa

Metoda bezpośredniej syntezy cyfrowej to technika generacji sygnałów, oparta w całości na cyfrowych metodach syntezy sygnału. Układy DDS stały się alternatywą dla analogowych syntezerów opartych na pętlach sprzężenia fazowego, zapewniając szybkie przestrajanie w szerokim zakresie częstotliwości oraz regulację amplitudy. Generatory korzystające z bezpośredniej syntezy cyfrowej charakteryzują się dokładnością w tworzeniu sygnałów dzięki dostępowi do pamięci, gdzie zawierają się próbki oraz specjalnego mechanizmowi zegarowemu, który różni się od tradycyjnej metody.

*Rysunek 3‑6 Blok bezpośredniej syntezy cyfrowej*

Bezpośrednia synteza cyfrowa w tym zagadnieniu jest wykorzystana tylko do generowania sygnałów akustycznych, o wartościach nie większych niż 16kHz. Popularność ta metoda zawdzięcza szerokiemu zastosowaniu w generacji sygnałów wysokich częstotliwości ze względu na dokładność i większe możliwości niż pętla sprzężenia fazowego.

Największe zalety bezpośrednie syntezy cyfrowej to:

* zdolność do generowania arbitralnych częstotliwości z dokładności a i stabilnością, ograniczone jedynie przez oscylator używany do sterowania akumulatorem fazy,
* idealna powtarzalność generowanych sygnałów i natychmiastowa reakcja na zmianę oczekiwanej częstotliwości wyjściowej,
* prostota w implementacji i niskie zużycie zasobów.

## Generacja sygnałów

Sygnałem taktującym procesor cyfrowy jest generator przestrajany numerycznie NCO. W procesie generacji następuje podział częstotliwości przez współczynnik w akumulatorze fazy. Sygnał zegarowy jest generowany w bloku oscylatora. Poniżej znajduje się schemat blokowy.

*Rysunek 3‑7 Schemat blokowy oscylatora DDS*

### Zegar referencyjny

Zegar referencyjny ma za zadania wytworzenie słowa przestrajającego, aktualizowanie wartość akumulatora fazy oraz kieruje konwersją cyfrowo-analogową. Zegar referencyjny determinuje, kiedy próbka jest przesyłana w przetworniku, ale nie ma bezpośredniego wpływa na częstotliwość sygnału. Zegarem wejściowym jest sygnał z pętli sprzężenia zwrotnego o częstotliwości wyjściowej 50MHz. W instancji sample\_clk\_gen sygnał ten zostaje podzielony 512 razy dobrany wielkością do tworzenia sygnałów o częstotliwościach akustycznych.

### Akumulator fazy

Sercem każdego syntezatora korzystającego z bezpośredniej syntezy cyfrowej jest akumulator fazy. Ten komponent jest zbiorem słów przestrajających(ang. tuning word), które pozwalają na dokładne wytworzenie częstotliwości sygnału. Każde z tych słów oznacza skok między próbkami. Im większy skok tym więcej wartości jest pomijanych,co skutkuje szybszym pokonaniem koła fazy cyfrowej przedstawiony na rysunku 3-8. Jedno okrążenie wokół koła cyfrowego oznacza jeden okres dla sygnału. Największe częstotliwości mają największą wartość słowa przestrajającego. Rozdzielczość implementowanego syntezera wynosi 32-bity, wystarczająco dużo, by zapewnić dokładną generacje dźwięku.

*Rysunek 3‑8 Koło fazy cyfrowej*

Moduł *NOTE\_TO\_PA* przedstawiony na rysunku 3-7 jest odpowiednikiem tablicy przekształcenia numeru danego dźwięku na skok akumulatora fazy. Wartości w tej tablicy są liczone według wzoru 3.5.1.

Do obliczenia częstotliwości generowanego sygnału służy wzór:

fOUT – częstotliwość wyjściowa,

M – słowo przestrajające,

fC - częstotliwość zegara referencyjnego,

n- rozdzielczość akumulatora fazy.

Korzystając ze wzoru 3.5.1 oraz posiadając tablice częstotliwości dla tonów muzycznych (tabela 2) wyznaczono słowa przestrajające, które mają kluczowe znaczenie dla działania akumulatora fazy. Projektując syntezer z użyciem bezpośredniej syntezy cyfrowej należy również pamiętać o twierdzeniu o próbkowaniu. Maksymalna częstotliwość generowanego przebiegu przy maksymalnym kroku fazy wynoszącym połowę kola fazowego może wynosić maksymalnie fmax = fc/2. Graficznie na rys została przedstawiona zależność dwóch sygnałów gdzie krok drugiego sygnału został zwiększony cztery razy.

*Rysunek 3‑9 Analiza czterokrotnego pomnożenia kroku*

W celu przybliżenia generacji sygnału przy pomocy koła fazowego niżej przedstawiono graficznie jak wartości na kole fazowym odpowiadają wartościom napięć. Przed zapisywaniem sygnału sinusoidy, powstają próbki a po zakończeniu generacji sygnału cyfrowego, następuje konwertowanie do sygnału analogowego przez przetwornik.

*Rysunek 3‑10 Generacja sinusoidy*

Dodatkowym elementem w akumulatorze fazy jest rejestr fazy. Jest to operacja zmniejszania rozdzielczości akumulatora fazy. Duża rozdzielczość akumulatora fazy jest wymagana do otrzymania mały odstępów częstotliwość na każdy skok(około 0,006Hz na skok dla implementowanego syntezera). Rejestr fazy pozwala na użycie mniejszych tablic niż rozdzielczość akumulatora fazy. Ten zabieg oszczędzą miejsce w pamięci, jego początkiem był fakt nierozwiniętej w takim stopniu technologii do trzymania tak dużej ilości danych. W ten sposób możemy regulować dokładność generowanego przebiegu bez ingerencji w efektywność akumulatora fazy.

### Tablica z próbkami

Implementowany syntezator zawiera cztery różne pamięci tablicowe. Każda z nich zawiera jeden okres przebiegu o danym kształcie, co pozwala na dokładne odtworzenie sygnału przez akumulator fazy. Sygnał z wyjścia rejestru fazy determinuje wybór próbki z tablicy. Tablica składa się z 256 wartości, które zawierają kształt danego przebiegu. Wyjątkiem jest tablica przebiegu prostokątnego, która zawiera tylko dwie wartości – amplitudę stanu niskiego i wysokiego. Wartość wejściowa z rejestru fazy oznacza wybór danej wartości z tablicy próbek a następnie ta wartość próbki jest przesyłana do instancji miksera. Przykładowa generacja sygnału z wykorzystaniem tablicy została przedstawiona na rysunku 3-11.

*Rysunek 3‑11 Generacja sinusoidy z wykorzystaniem tablicy*

Wartości próbek w tablicach są zapisane w formacie 16-bitowych zmiennych ze znakiem. Przedział amplitud został ograniczony w przedziale od -32000 do 32000.

Użycie akumulatora fazy oraz metody tablicowej generuje dokładne przebiegi. Wady i zalety metody tablicowej zostały opisane w punkcie 1.4.1 *Synteza z użyciem tabeli przebiegu fali.*

### Mikser

Połączenie sygnałów z kilku oscylatorów wymaga użycia miksera. Mikser kontroluje wyjściową wartość amplitudy, aby sygnał nie uległ nasyceniu przez duże wartości amplitud kilku sygnałów.

*Rysunek 3‑12 Blok miksera*

Moduł miksera został zbudowany w oparciu o istniejące przykłady. Wszystkie sygnały z oscylatorów są przekazywane a użytkownik korzystając z przycisków zmienia wartość sygnału *WAV\_SELECT*. Dane wyjściowe są kierowane do przetwornika lub interfejsu audio.

## Interfejs użytkownika

Użytkownik ma umożliwiona kontrolę na generowanym sygnałem. Korzystając z przycisków oraz wyświetlacza na ekspanderze można wybrać kształt fali na wyjściu oraz liczbę użytych oscylatorów. Przyciski są wyposażone w debouncer, który zatrzaskuje się po naciśnięciu na jedną sekundę, dzięki czemu mikrokontroler nie ma problemów z odczytywaniem zamiarów użytkownika. Liczba użytych wyświetlaczy została zredukowana do jednego, ze względu na wybór mniej niż dziesięciu funkcji syntezatora. Ewentualna rozbudowa architektury projektu nie przeszkadza w użyciu pozostałych wyświetlaczy.

## Dźwięk w programie Audacity

Z powodu problemów generacji dźwięku interfejsem HDMI, osiągniecie rezultatów osiągnięto przez symulacje, zapis wygenerowanych próbek oraz odtworzenie pliku pcm w darmowym edytorze plików dźwiękowych Audacity.

*Rysunek 3‑13 Sygnały wygenerowane w Audacity*

Generacja sygnału w tym programie odbywa się poprzez importowanie pliku pcm. Końcowe rezultaty potwierdzają poprawne działanie syntezatora. Do wykonania poprawnej generacji należy użyć widoku listu, przeciągnąć wygenerowany sygnał do okna listy i zapisać do pliku.

Generowanie dźwięku odbywa się w trzech krokach:

* zapis danych wyjściowych z symulacji,
* konwersja z formatu hex do ASCII i zapis pliku z rozszerzeniem pcm,
* import danych z powyższymi ustawieniami.

Ustawienia do generowania dźwięku w Audacity:

* kodowanie – bez znaku 16-bit PCM,
* kolejność bajtów – big endian,
* kanały – 1 kanał (mono),
* offset – 0 bajtów,
* ilość importowanych bajtów – 100%,
* częstotliwość próbkowania – 44100 Hz.

Wygenerowane sygnały są eksportowane do formatu wav, który umożliwia odsłuchanie próbki. Otrzymane wyniki są zgodne z założeniami i potwierdzają prawidłowe działanie syntezera. Na tym etapie prace nad syntezatorem zostają zakończone.

# Podsumowanie i wnioski

Implementacja syntezatora została zakończona sukcesem. Niestety jedno z głównych założeń, czyli generacja dźwięku przy użyciu interfejsu HDMI nie zostało spełnione. Liczba prób realizacji tego założenia oraz czas włożony w rozwój projektu pod tym względem pozostawia możliwość ukończenia sterowania interfejsem HDMI w prawdopodobnie krótkim czasie. Potencjał płytki MAXimator nie został całkowicie wykorzystany, co pozostawia chęć do zbudowania syntezatora o większej funkcjonalności.

W projekcie wykorzystano układ FPGA jako generator sygnałów pracujący w trybie bezpośredniej syntezy cyfrowej. Istnieje duża możliwość rozbudowania projektu o większą ilość sygnałów, dodanie filtru lub efektów dźwiękowych, które ze zostały zaimplementowane z uwagi na. Udało się zaobserwować wygenerowane sygnały oraz przetworzyć do formatu .wav oraz je odsłuchać. Na chwilę obecną syntezator jest narzędziem czysto programowym ale już są planowane pracę nad uruchomieniem projektu wraz z interfejsem HDMI lub innym dostępnym kodekiem.

Projekt w układzie FPGA zajmuje:

* 1412 logicznych elementów (18% całości),
* 387 rejestrów,
* 11 z 178 dostępnych pinów,
* jeden moduł PLL z dwóch dostępnych.

# Streszczenie

Tematem pracy jest syntezator dźwięku w układzie FPGA. Projekt został zbudowany w środowisku Intel Quartus Prime z wykorzystaniem języku opisu sprzętu VHDL. Jednym z głównych założeń projektu była generacja dźwięku przez interfejs HDMI. Niestety po wielu próbach, prace nad uruchomieniem HMDI zakończyły się niepowodzeniem ale projekt będzie kontynuowany celem osiągniecia zamierzonych rezultatów.

Syntezator jest instrumentem muzycznym, generatorem sygnałów akustycznych. Dogłębna analiza tematu współczesnych syntezatorów wskazała na użycie interfejsu MIDI do komunikacji między urządzeniem a innymi instrumentami.

Użytkownik obsługuje instrument przy użyciu przycisków znajdujących się na płycie ekspandera dołączonej do zestawu MAXimator. Funkcja syntezatora zostaje wyświetlona na płytce, tak by osoba sterująca miała pełną kontrolę nad urządzeniem.

W pracy została zawarta rozprawa na temat różnic w budowie i funkcjonalności syntezatorów a także nacisk na funkcjonalność i dopasowanie metod syntezy do cyfrowego układu FPGA. Ostatecznie w projekcie wykorzystano metodę syntezy bezpośredniej z wykorzystanie tablic pamięci do generacji przebiegów. Satysfakcjonujące wyniki otrzymano przez symulacje i generacje zapisanych próbek do formatu wav.

# Summary

The subject of the diploma is a sound synthesizer in FPGA. The project was built in the Intel Quartus Prime environment using the VHDL hardware description language. One of the main assumptions of the project was the generation of sound via the HDMI interface. Unfortunately, after many attempts, work on starting the HMDI was unsuccessful. Despite the lack of results, the project will be continued in order to achieve the intended results.  
 Synthesizer is a musical instrument, a generator of acoustic signals. After depth analysis of the topic of modern synthesizers indicated the use of MIDI interface for communication between the device and other instruments.  
 The user operates the instrument using the buttons on the expander board attached to the MAXimator kit. The synthesizer function is displayed on the board so that the control person has full control over the device.  
 The work included a dissertation on the differences in the structure and functionality of synthesizers, as well as the emphasis on functionality and adaptation of synthesis methods to the digital FPGA system. Finally, the project used a direct synthesis method with the use of memory tables for generation of waveforms. Satisfactory results were obtained by simulations and generations of saved samples to the wav format.

# Spis stosowanych skrótów

ARMA – Autoregresja i ruchoma średnia

ADSR – Attack Decay Sustain Release

DDS – Direct Digital Synthesis

FPGA – Field Programmable Gate Array

HDMI – High Definition Multimedia Interface

LFO – Low Frequency Oscillator

MIDI – Musical Instrument Digital Interface

NCO - Numerically Controlled Oscillator

UART –Universal Asynchronous Receiver Transmitter

VCO – Voltage Controlled Oscillator

VST – Virtual Studio Technology

# Słowa kluczowe

* ASIC,
* syntezator,
* bezpośrednia synteza cyfrowa,
* synteza częstotliwości,
* generacja dźwięku,
* MAXimator,
* Altera MAX10.

# Keywords

* FPGA,
* synthesizer,
* direct digital synthesis,
* frequency synthesis,
* sound producing,
* MAXimator,
* Altera MAX10.

# Bibliografia

1. Antoszkiewicz K., *Generacja i synteza częstotliwości*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015, str. 260-271.
2. Bhasker J., *A VHDL Primer,* Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1999.
3. Naylor D., Jones S., *VHDL: a logic synthesis approach,* London: Chapman & Hall, 1997.
4. Pellegrino R., *The Electronic Arts of Sound and Light*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
5. Stępień M., *MIDI: Cyfrowy interfejs instrumentów muzycznych,* Gliwice: Helion, 2002.
6. Stępień R., *Syntezery DDS. Podstawy dla konstruktorów*, Legionowo: Wydawnictwo BTC, 2011.
7. Vankka J., Halonen K., *Direct digital synthesizers: theory, design and applications,* Boston: Kluwer Academic Publ., 2001.
8. Analog Devices, [Ask The Application Engineer – 33: All About Direct Digital Synthesis](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html,%20), [http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html,](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html,%20) stan na dzień: 05.01.2018
9. All About Circuts, [Everything You Need to Know About Direct Digital Synthesis](https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/direct-digital-synthesis/)*,* <https://www.allaboutcircuits.com/technicalarticles/direct-digital-synthesis/>*,* stan na dzień: 05.01.2018

# Dodatek A. Schemat połączenia MIDI z portem szeregowym UART



# Dodatek B. Spis zawartości dołączonej płyty CD

All About Direct Digital Synthesis \_ Analog Devices.htm – strona internetowa zawarta w bibliografii na pozycji 8,

Everything You Need to Know About Direct Digital Synthesis.htm – strona internetowa zawarta w bibliografii na pozycji 9,

Mateusz\_Dyrdół\_276528.doc – Tekst pracy zapisany w formacie MS Word,

Mateusz\_Dyrdół\_276528.pdf – Tekst pracy zapisany w formacie rozszerzonym,

synth.qar – Archiwum projektu wygenerowane w środowisku Intel Quartus Prime,

sine.pcm – plik w rozszerzeniu pcm do generacji sygnału sinusoidalnego,

saw.pcm – plik w rozszerzeniu pcm do generacji sygnału piłokształtnego,

triangle.pcm – plik w rozszerzeniu pcm do generacji sygnału trójkątnego,

sine.wav - plik dźwiękowy z sygnałem sinusoidalnym,

saw.wav - plik dźwiękowy z sygnałem piłokształtnym,

triangle.wav - plik dźwiękowy z sygnałem trójkątnym.

# Spis ilustracji

[***Rysunek 1‑1 Metoda subtraktywna* 9**](#_Toc502942348)

[***Rysunek 1‑2 Obwiednia ADSR* 10**](#_Toc502942349)

[***Rysunek 1‑3 Blok syntezy FM* 11**](#_Toc502942350)

[***Rysunek 1‑4 Yamaha DX-7* 12**](#_Toc502942351)

[***Rysunek 1‑5 Syntezatory RCA MkI i MkII* 14**](#_Toc502942352)

[***Rysunek 1‑6 Minimoog Model D* 14**](#_Toc502942353)

[***Rysunek 1‑7 Ściana syntezatorów* 15**](#_Toc502942354)

[***Rysunek 1‑8 Syntezator cyfrowy Novation Mininova* 16**](#_Toc502942355)

[***Rysunek 1‑9 Arturia Minimoog V, wirtualny odpowiednik instrumentu Minimoog* 17**](#_Toc502942356)

[***Rysunek 1‑10 Xfer Serum, jedna z najbardziej popularnych wtyczek VST na rynku* 18**](#_Toc502942357)

[***Rysunek 2‑1 Gniazdo i wtyczka DIN 5* 19**](#_Toc502942358)

[***Rysunek 2‑2 Numeracja wyjść gniazda DIN 5* 20**](#_Toc502942359)

[***Rysunek 2‑3 Interfejs MIDI Prodipe 4I4O* 20**](#_Toc502942360)

[***Rysunek 2‑4 Ramka MIDI* 21**](#_Toc502942361)

[***Rysunek 3‑1 Wygląd płytki bazowej MAXimator* 23**](#_Toc502942362)

[***Rysunek 3‑2 USB Blaster* 24**](#_Toc502942363)

[***Rysunek 3‑3 Wygląd płytki bazowej MAXimator* 24**](#_Toc502942364)

[***Rysunek 3‑4 Architektura syntezera* 26**](#_Toc502942365)

[***Rysunek 3‑5 Blok dekodera MIDI* 27**](#_Toc502942366)

[***Rysunek 3‑6 Blok bezpośredniej syntezy cyfrowej* 28**](#_Toc502942367)

[***Rysunek 3‑7 Schemat blokowy oscylatora DDS* 29**](#_Toc502942368)

[***Rysunek 3‑8 Koło fazy cyfrowej* 30**](#_Toc502942369)

[***Rysunek 3‑9 Analiza czterokrotnego pomnożenia kroku* 31**](#_Toc502942370)

[***Rysunek 3‑10 Generacja sinusoidy* 32**](#_Toc502942371)

[***Rysunek 3‑11 Generacja sinusoidy z wykorzystaniem tablicy* 33**](#_Toc502942372)

[***Rysunek 3‑12 Blok miksera* 33**](#_Toc502942373)

[***Rysunek 3‑13 Sygnały wygenerowane w Audacity* 34**](#_Toc502942374)

# Spis tabel

[***Tabela 1 Przyporządkowane piny do sygnałów* 25**](#_Toc502937456)

[***Tabela 2 Tablica częstotliwości dla piątej oktawy* 27**](#_Toc502937457)

1. Norma energtyczna [↑](#footnote-ref-1)