

Zastosowania Procesorów Sygnałowych

dr inż. Piotr Ody

piotrod@sound.eti.pg.gda.pl

p. 730 - Katedra Systemów Multimedialnych

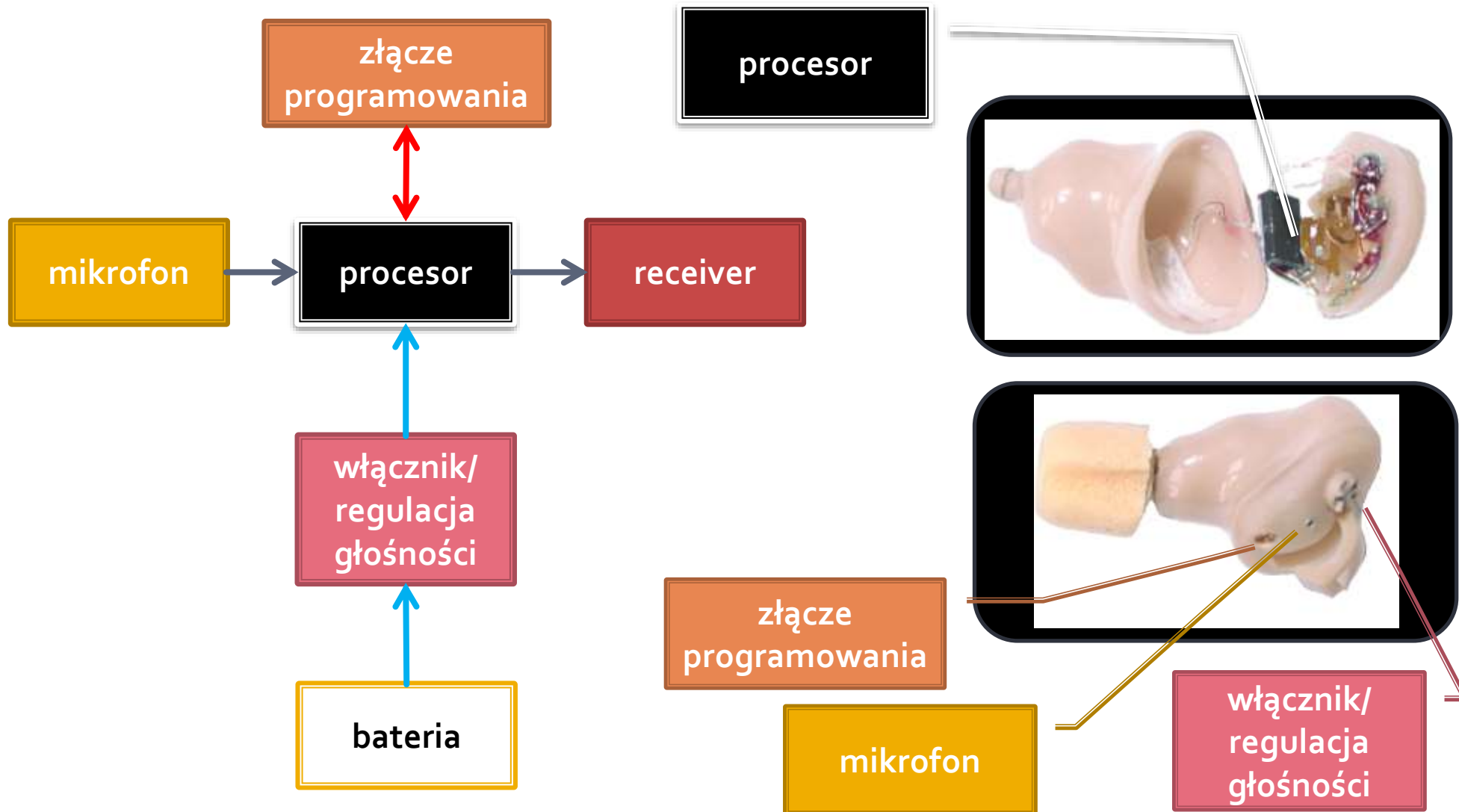
**Procesory sygnałowe w aparatach
słuchowych (ale nie tylko)**

Specyfika



- typowe zastosowanie: aparaty słuchowe
 - dość typowa budowa
- niewielkie wymiary
 - urządzenie musi zmieścić się w kanale usznym
- mały pobór mocy
 - urządzenie pracuje przez wiele godzin
- możliwość łatwego programowania parametrów urządzenia

Aparat słuchowy - konstrukcja



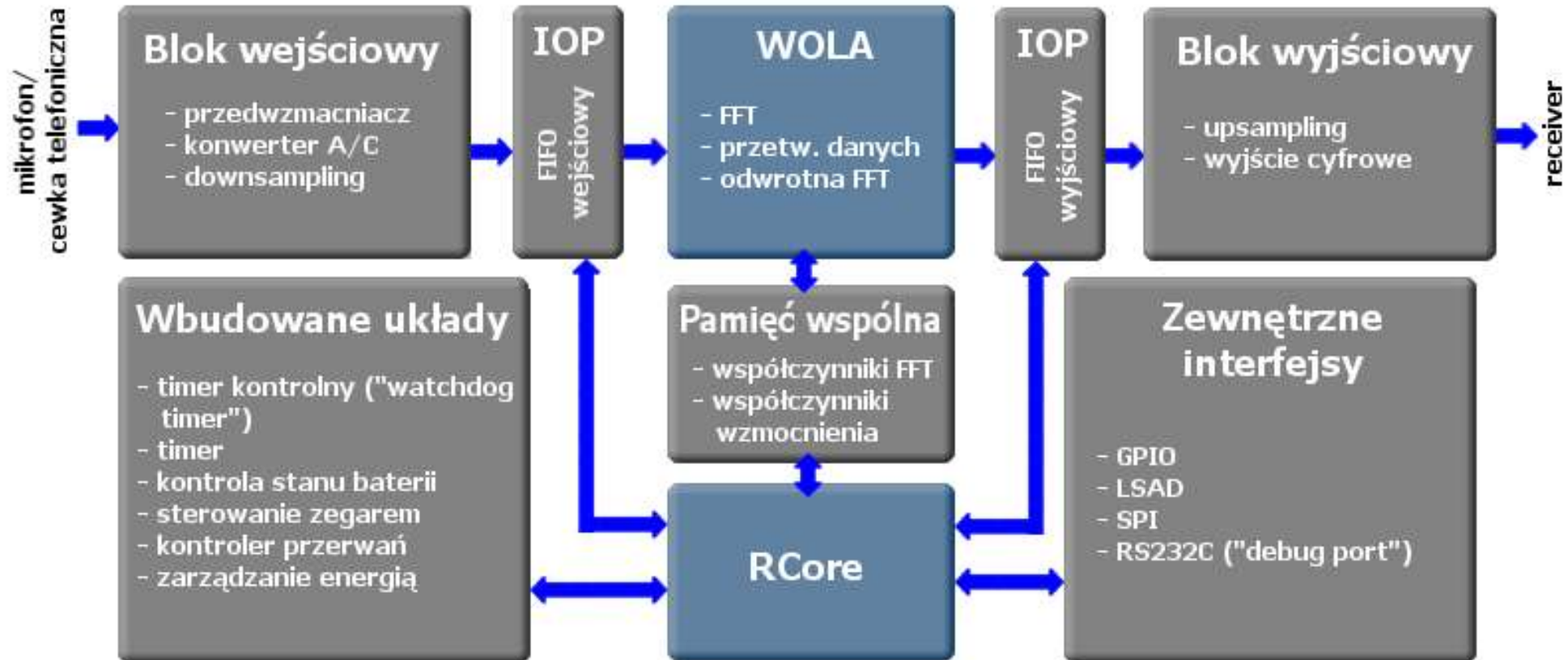
Procesor Toccata Plus

- Wymiary 5.97 x 3.48 x 1.52 mm (z wbudowanym EEPROM-em)
- Pobór prądu rzędu nawet 400μA
- Częstotliwość pracy zegara: 1.28MHz, 1.92, 2.56MHz (teoretycznie od 640kHz do 3.84MHz)
- Częstotliwości próbkowania do 40kHz (teoretycznie nawet do 60kHz)
- Napięcie zasilania: 1.2V
- Wbudowany koprocesor WOLA (weighted overlap-add) odpowiadający za realizację transformacji Fouriera
- Wydajność: 5MIPS/MHz
- Dodatkowy 10-bitowy przetwornik LSAD (low-speed analog) o typowej częstotliwości próbkowania 1.6kHz
- **Programowanie wyłącznie w assemblerze**

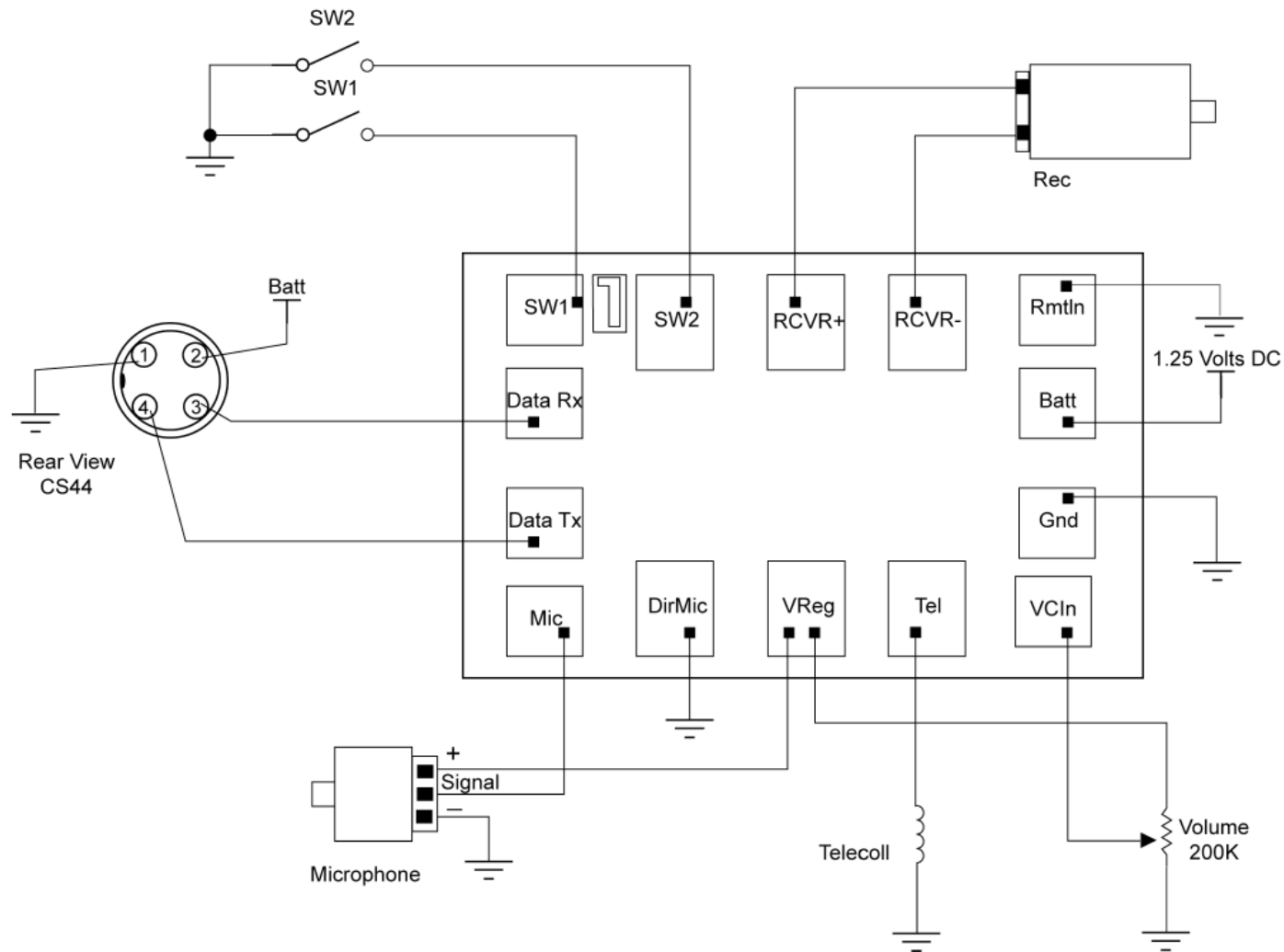
Częstotliwości próbkowania

ADC_CTRL_SAMPLE_FREQ	MCLK=640 kHz SYS_CLK= n*MCLK	MCLK=1.28 MHz SYS_CLK= n*MCLK	MCLK=1.92 MHz SYS_CLK= n*MCLK	MCLK=2.56 MHz SYS_CLK= n*MCLK	MCLK=3.84 MHz SYS_CLK= n*MCLK
0x0	10000	20000	30000	40000	60000
0x1	8888.889	17777.78	26666.67	35555.56	53333.33
0x2	8000	16000	24000	32000	48000
0x3	7272.727	14545.45	21818.18	29090.91	43636.36
0x4	6666.667	13333.33	20000	26666.67	40000
0x5	6153.846	12307.69	18461.54	24615.38	36923.08
0x6	5714.286	11428.57	17142.86	22857.14	34285.71
0x7	5333.333	10666.67	16000	21333.33	32000

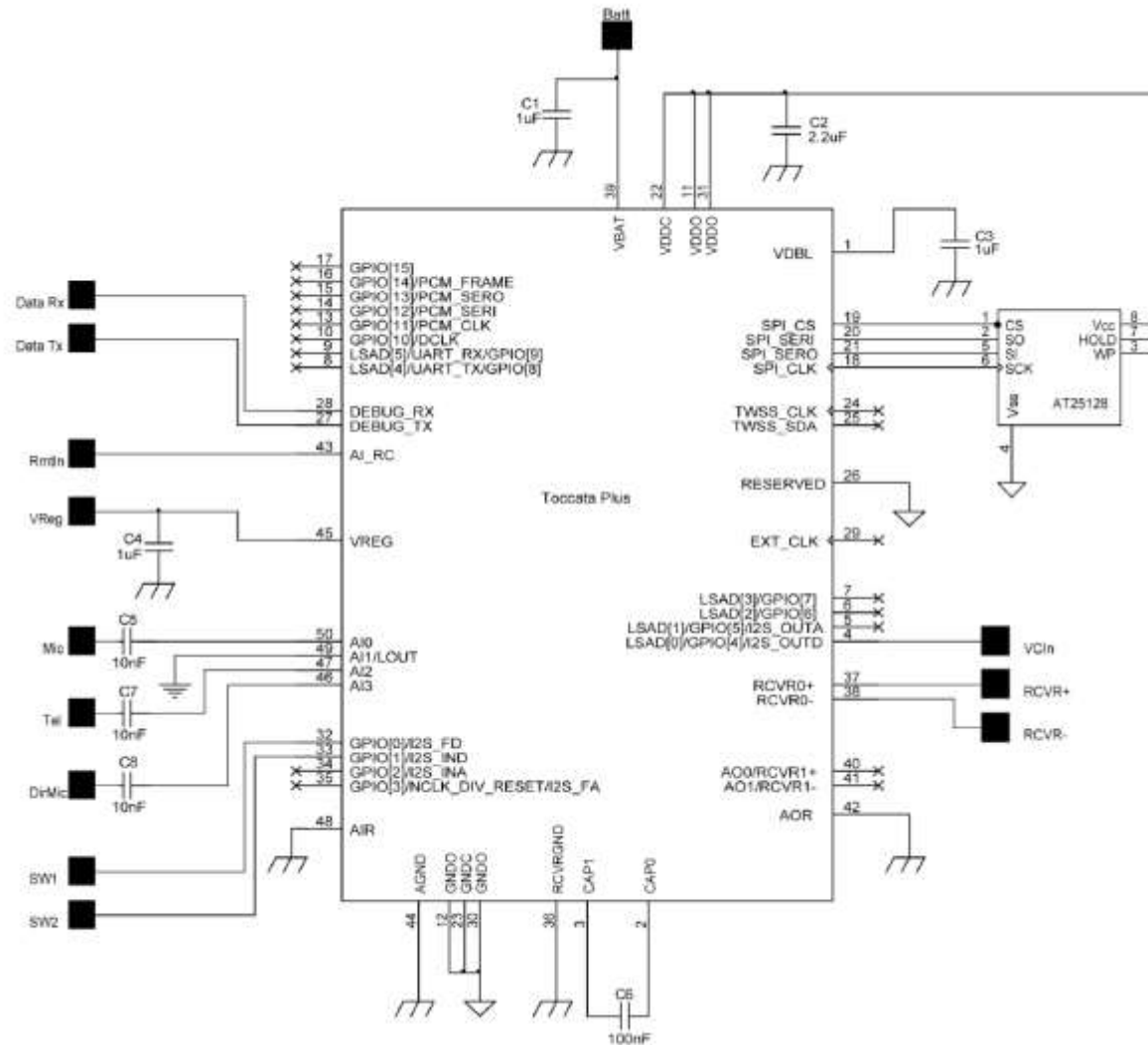
Budowa



Schemat typowego aparatu



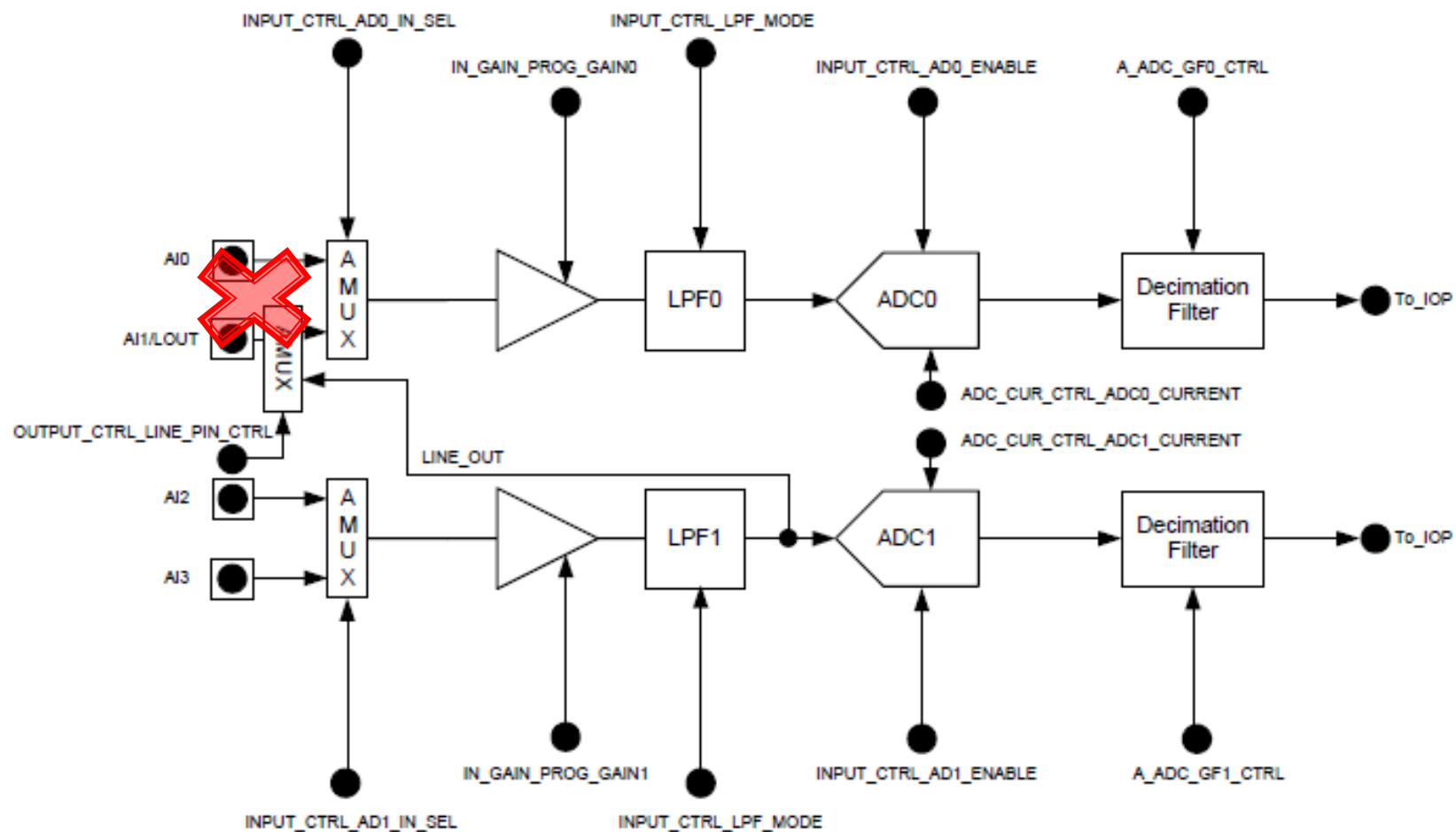
Schemat wewnętrzny procesora



Bloki wejściowe

- Dwa 16-bitowe przetworniki A/C z ośmiokrotnym nadpróbkowaniem
- Konfigurowalne przedwzmacniacze i filtry antyzakładowe (antyaliasingowe)
- Cyfrowe filtry dolnoprzepustowe (decymacyjne) dziewiątego rzędu
 - usuwanie składowej stałej

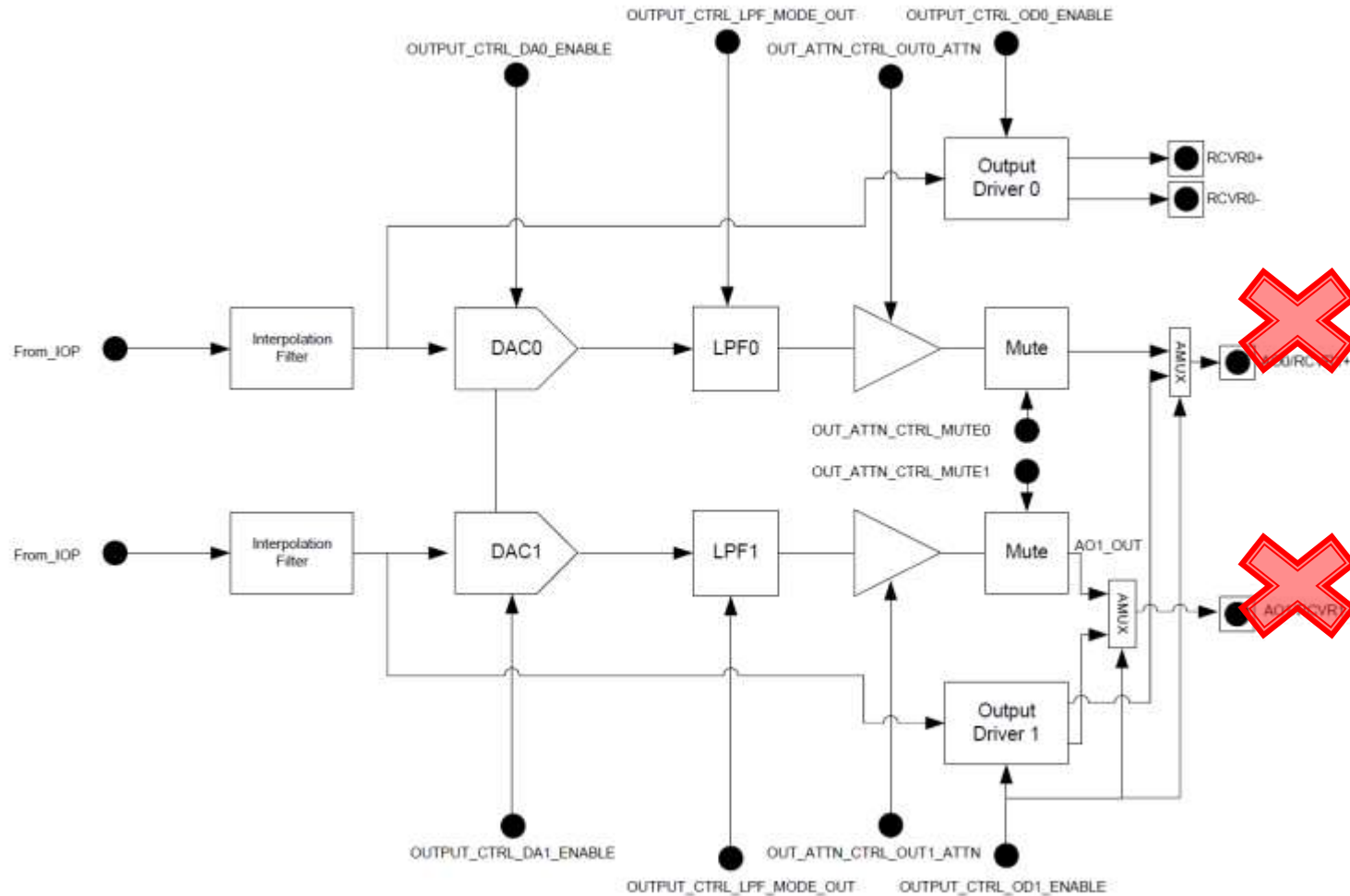
Bloki wejściowe



Bloki wyjściowe

- Dwa 16-bitowe przetworniki C/A
- Konfigurowalne filtry przeciwzakładowe
- Bezpośrednie wyjście cyfrowe (ang. *Direct Digital Output*)
 - eliminuje konieczność stosowania dodatkowych wzmacniaczy sygnału przy korzystaniu z pasywnych głośników (receiverów)
 - realizuje funkcję wzmacniacza klasy D.
- Dwa wyjścia analogowe

Bloki wyjściowe



Podprocesor RCore

- 16-bitowym procesor stałoprzecinkowy
- wbudowane procedury przyspieszające amplitudową obróbkę sygnałów
- sprawuje nadzór nad funkcjonowaniem całego systemu
- 40-bitowy akumulator podzielony na trzy podrejstry
 - dwa 16-bitowe (AH i AL)
 - jeden 8-bitowy (AE)
- osiem rejestrów adresowych (R0-R7) 16-bitowych
- dwa rejestry kontrolne (LCo i LC1)
 - rejestr R3 spełnia typowo funkcję stosu systemowego
 - R7 może pełnić rolę stosu użytkownika
- cztery rejestry związane bezpośrednio z wbudowanymi w procesor instrukcjami mnożenia
 - X i Y: rejestry wejściowe
 - PH i PL: rejestry wyjściowe

Podprocesor WOLA

- Układ zmiennoprzecinkowy mający za zadanie transformować sygnał z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości i odwrotnie
 - Posiada regulowane parametry filtrów (np. liczba pasm, długość FFT, liczba kanałów)
 - Opóźnienie grupowe wprowadzane przez procesor jest bardzo małe (poniżej 4ms przy 16 pasmach)
- Przeznaczony do szybkiej obróbki amplitudy i fazy widma sygnałów
- Maksymalne cyfrowe wzmocnienie możliwe do wprowadzenia przez koprocesor WOLA to 90dB
- Wydajność tego procesora określana jest jako 5MIPS/MHz.

Podprocesor IOP

- IOP –Input/Output Processor
 - kontroler DMA
 - nadzoruje przepływ danych wewnątrz procesora

Architektura pamięci

- dwie pamięci robocze oznaczone literami X i Y
 - rozmiar każdej z tych pamięci to 4096×16 bitów
 - adresowanie pamięci X odbywa się poprzez rejestry R₀-R₃
 - adresowanie pamięci Y z wykorzystaniem rejestrów R₄-R₇
 - część instrukcji procesora potrafi jedynie operować na pamięci X
 - pamięć Y lepiej jest przeznaczyć do przechowywania współczynników filtrów czy tablic stałych niż do gromadzenia w niej danych fonicznych
- rozmiar pamięci, w której przechowywany jest program (oznaczonej literą P) to 12288×16 bitów
 - możliwe jest wykorzystanie tej pamięci do zapisu danych, ale jest to mało efektywne (strata cykli zegara na dostęp)
- rozmiar wejściowych i wyjściowych buforów FIFO to 364×16 bitów

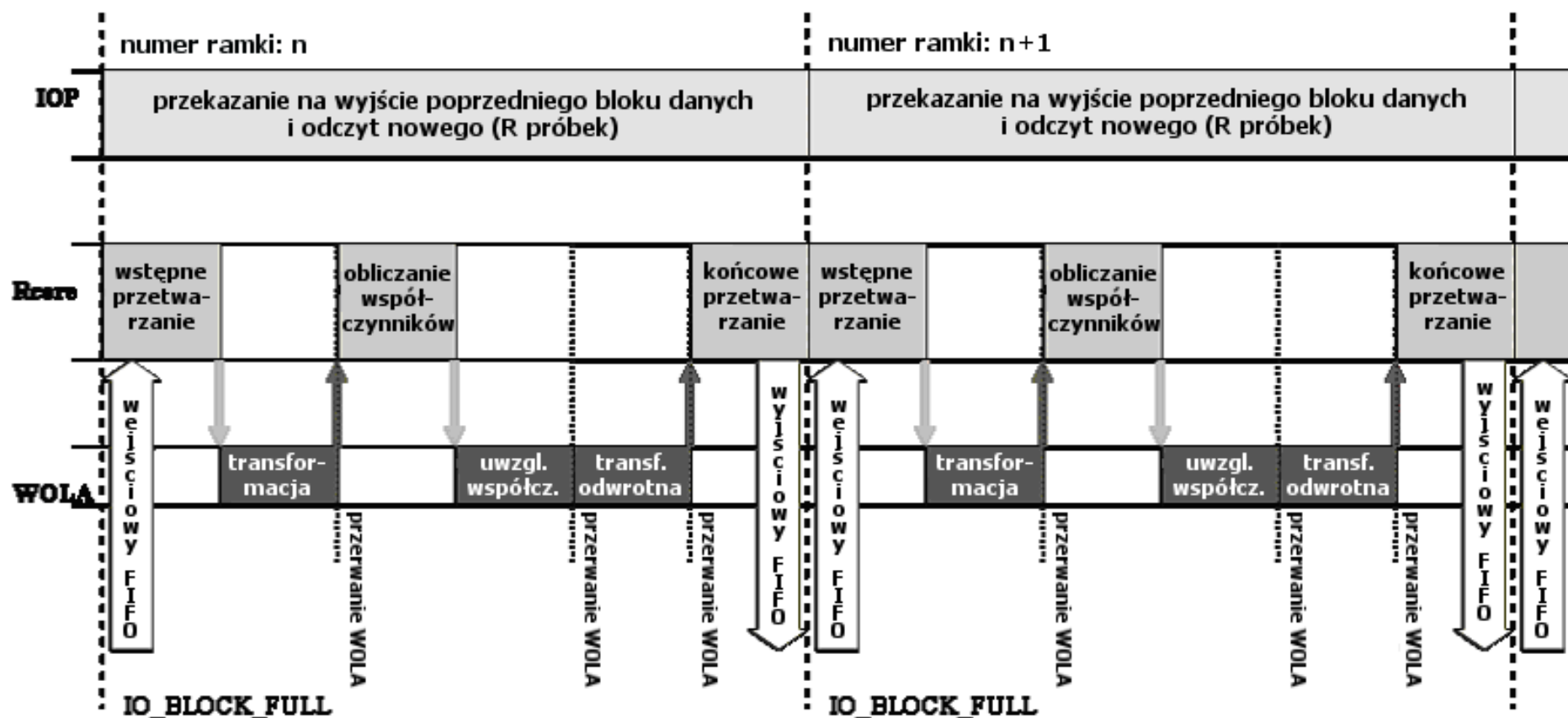
Przetwarzanie sygnałów

- dane z bufora wejściowego są transformowane do dziedzinę częstotliwości i zapisywane w postaci zespolonej, proces określa się mianem analizy (ang. *analysis*), zajmuje się tym procesor WOLA;
 - obliczenie parametrów przetwarzania sygnału w poszczególnych pasmach (tzw. *gain calculation*), wykonywane przez Rcore;
 - uwzględnienie obliczonych parametrów (tzw. *gain application*), wykonywane przez WOLA;
 - transformacja odwrotna sygnału, określana mianem syntezy (tzw. *synthesis*), czym znowu zajmuje się procesor WOLA.
- Ponadto przed transformacją oraz po transformacji odwrotnej możliwe jest dodatkowe przetwarzanie sygnałów w dziedzinie czasu.

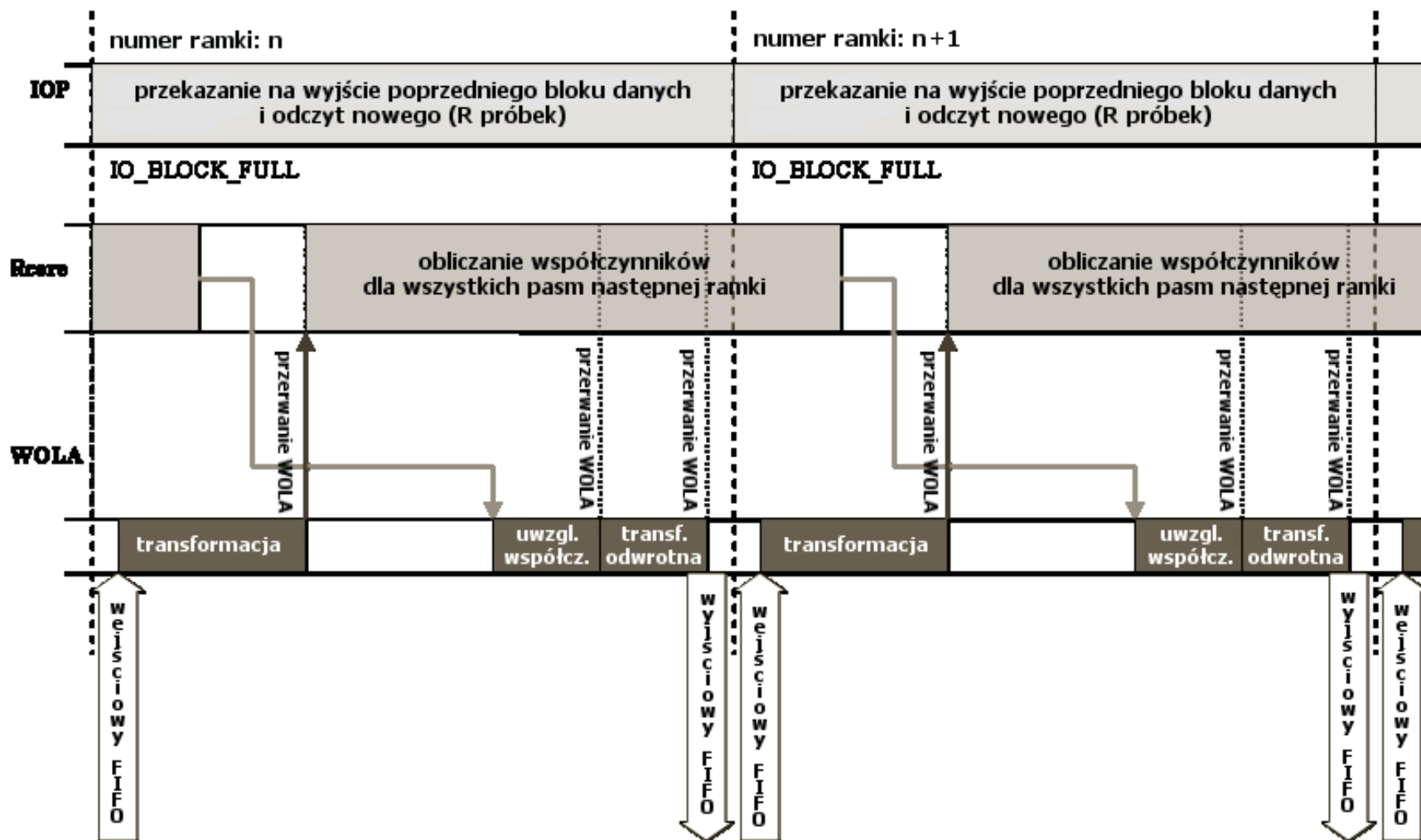
Tryby pracy

- tryb natychmiastowego uwzględniania obliczonych parametrów (ang. *Immediate Gain Application Framework*),
- tryb uwzględniania obliczonych parametrów z opóźnieniem jednej ramki (ang. *Frame Delay Application Framework*),
- tryb uwzględniania obliczonych parametrów z podziałem pasm na grupy (ang. *Time-Slicing Application Framework*).

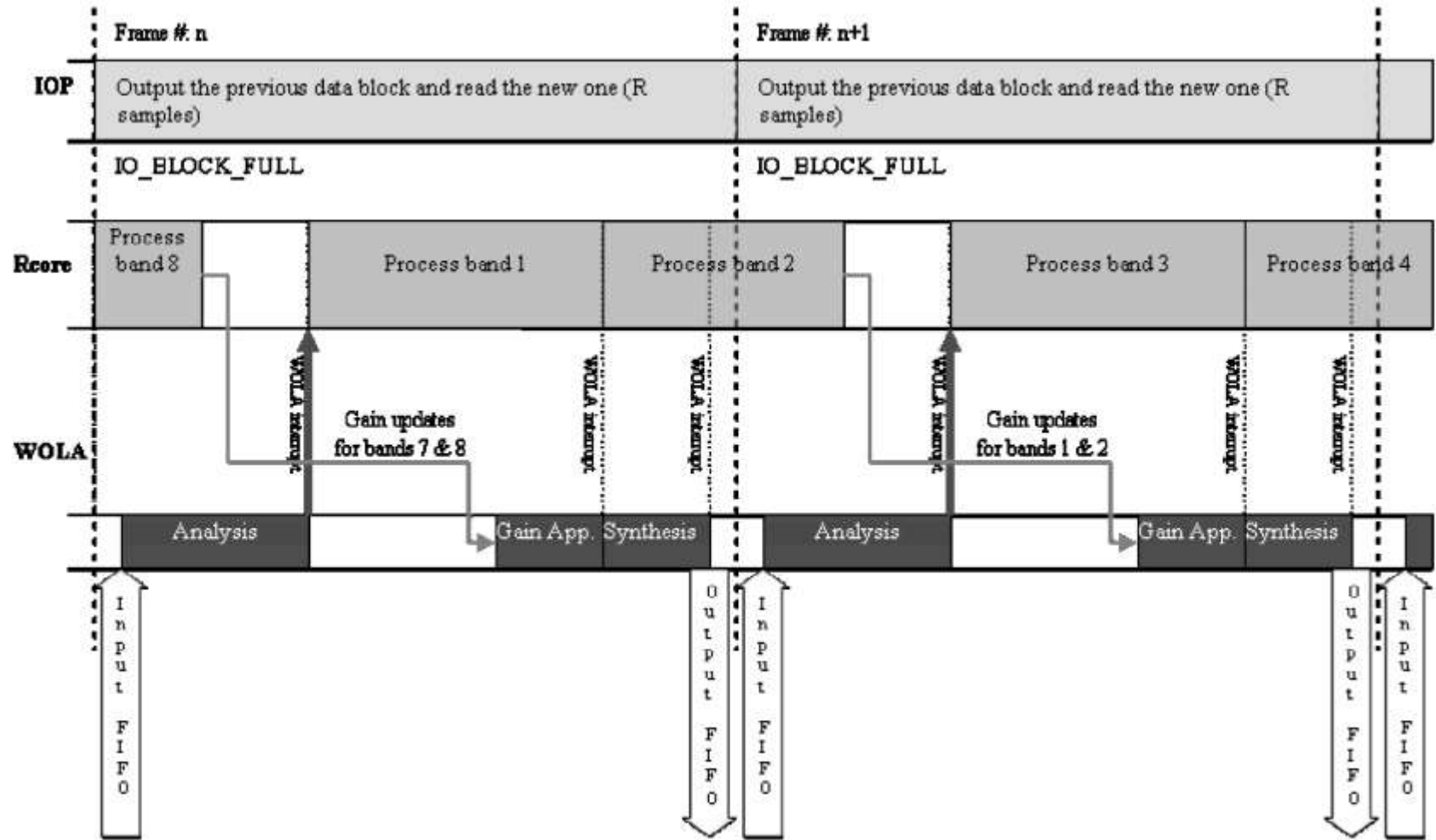
Immediate Gain Application Framework



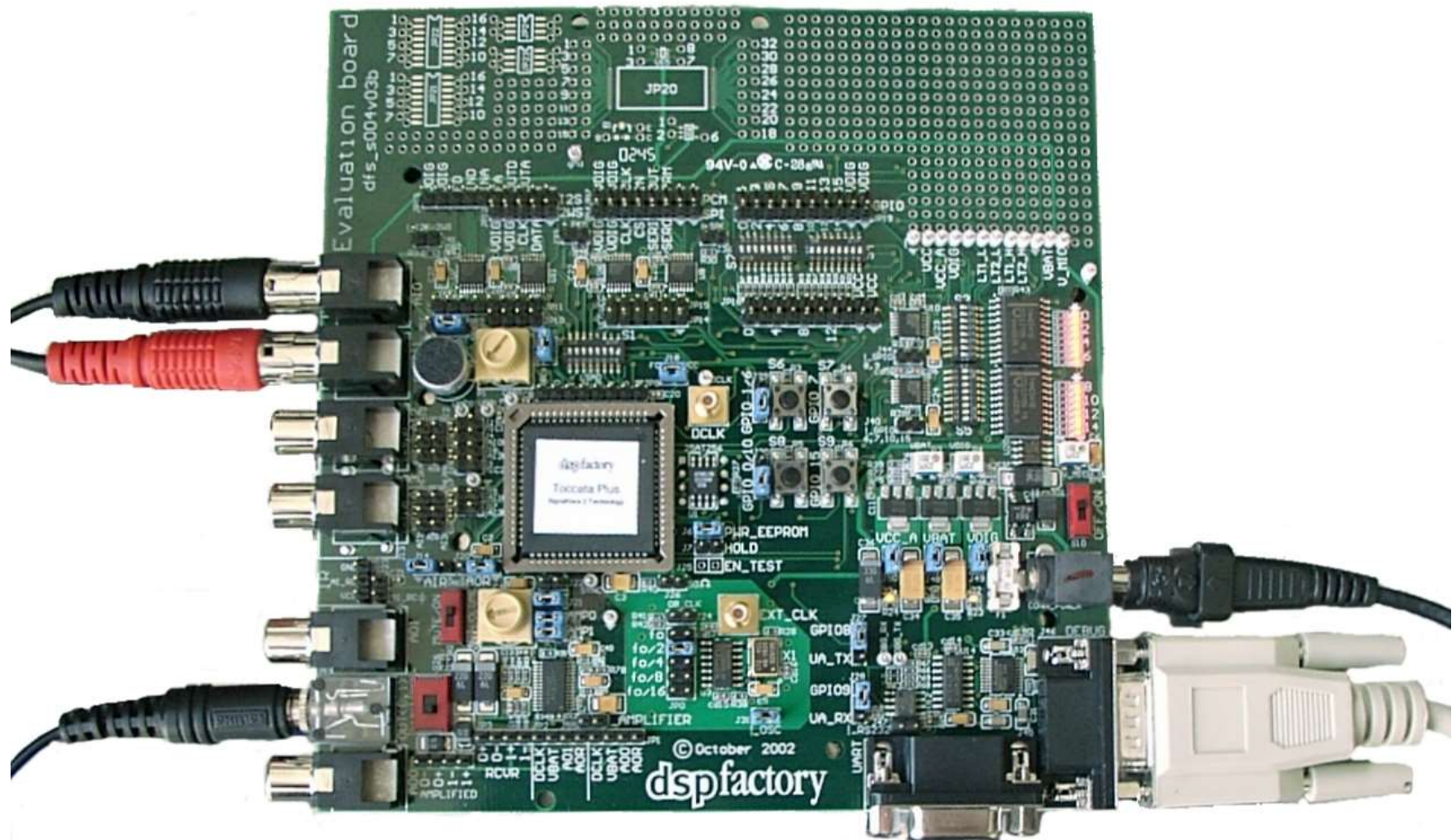
Frame Delay Application Framework



Time-Slicing Application Framework



Zestaw uruchomieniowy



Przykładowe zastosowania

- Subminiaturowy Korektor Mowy
- Cyfrowa Krtąń Elektroniczna
- Urządzenie kieszonkowe
- Aparat w oprawce okularów
- Spowalnianie mowy

Subminiaturowy Korektor Mowy

Jąkanie

- Jąkanie jest jedną z częściej spotykanych wad mowy
 - ok. 0,5-1% populacji każdego kraju to osoby jękające się
 - jąkanie zakłóca proces komunikowania się
 - jąkanie jest zaburzeniem złożonym i długotrwałym
- Patogeneza jąkania nie jest do końca poznana
 - dziedziczne skłonności w formie niepełnowartościowego systemu wegetatywnego
 - przyuczanie dzieci leworęcznych do posługiwania się prawą ręką
 - ogólna niesprawność motoryczna
 - silne emocje
 - **defekty kontrolnych pętli sprzężenia zwrotnego**

Audytywne sprzężenie zwrotne

- Modyfikacje wprowadzane w pętli audytywnego sprzężenia zwrotnego mogą poprawiać płynność mowy



- maskowanie sygnału mowy szumem (MAF – Masked Auditory Feedback)
 - opóźnianie sygnału mowy (DAF – Delayed Auditory Feedback)
 - transpozycja widmowa sygnału mowy (FAF – Frequency Altered Feedback)
- Rozwój technologii pozwala na wprowadzanie modyfikacji w pętli audytywnego sprzężenia zwrotnego

Cyfrowy Korektor Mowy

- wynalazek prof. A. Czyżewskiego i dr M.R. Mieszkowskiego
- opracowany na początku lat 90.
- wykorzystuje algorytmy DAF i FAF



Korektor subminiaturowy - założenia

- nie jest konieczne korzystanie z dwóch aparatów (dwóch „słuchawek”)
- użycie algorytmów DAF, FAF, DAF+FAF, a także
 - FAF-DAF
 - okresowa zmiana FAF na DAF
 - algorytm pogłosowy
 - rozwinięcie typowej metody DAF
 - modulacja opóźnienia
 - powoduje powstanie efektu chóralnego
- dodatkowe algorytmy
 - procesor dynamiki
 - korektor barwy
 - klucz głosowy
 - sygnalizacja stanu baterii

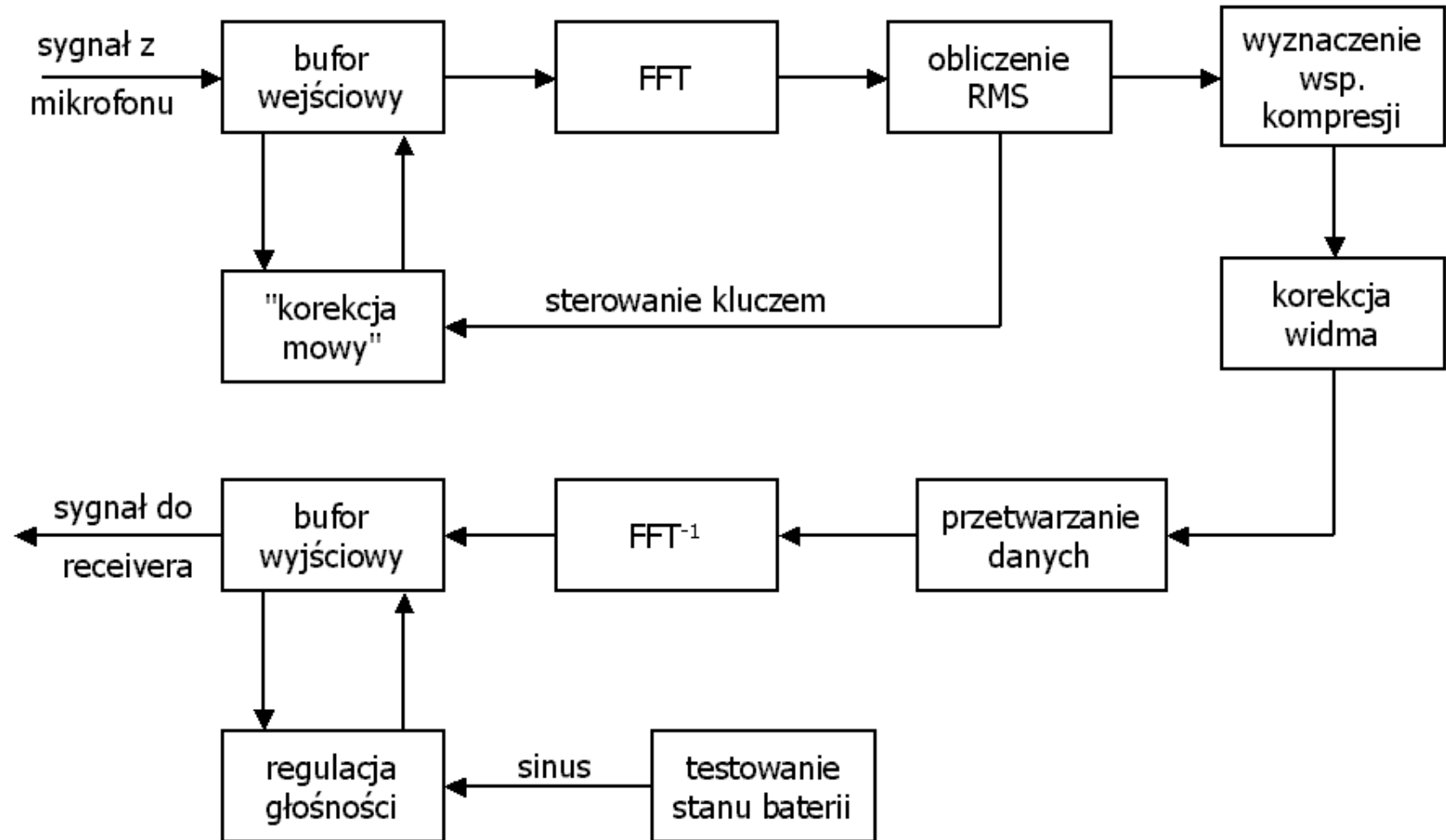


Subminiaturowy Korektor Mowy

- częstotliwość zegara: 1,92MHz;
 - przy częstotliwości 1,28MHz aplikacje realizujące FAF działały nieprawidłowo, konieczne było wykonanie zbyt wielu obliczeń w stosunku do możliwości procesora taktowanego zegarem o tej częstotliwości
- częstotliwość próbkowania: 16kHz;
- tryb pracy: tryb uwzględniania obliczonych parametrów z opóźnieniem jednej ramki (*Frame Delay Application Framework*);
- parametry procesora WOLA
 - praca odbywa się na blokach danych o długości 8 próbek,
 - długość okna analizy wynosi 128 próbek,
 - długość FFT: 32,
 - współczynnik nadpróbkowania i współczynnik decymacji równe 4.



Przetwarzanie dźwięku



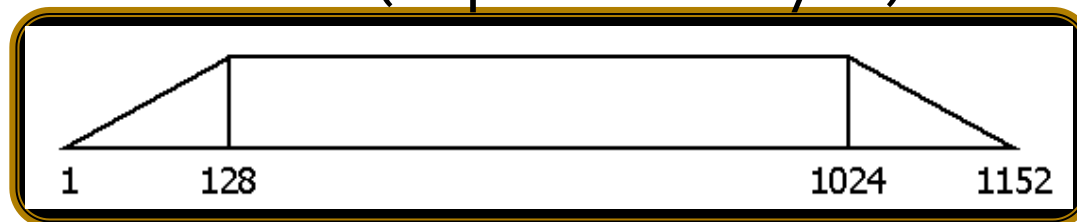
Algorytmy

■ DAF

- Bufory zlokalizowane w pamięciach X oraz Y
- Maksymalne opóźnienie: 3200 próbek
 - przy częst. próbk. 16kHz -> 400ms

■ FAF

- W pamięci X umieszczony jest bufor przejściowy o nominalnej długości 1024 próbek
- Po buforze przejściowym poruszają się niezależnie dwa wskaźniki (zapisu i odczytu)



Dodatkowe algorytmy

- Procesor dynamiki

- algorytm opiera się na obliczaniu wartości RMS energii w każdej ramce sygnału

$$\text{atak: } y(n) = \alpha x(n) + (1-\alpha) y(n-1)$$

$$\text{zwolnienie: } y(n) = \beta x(n) + (1-\beta) y(n-1)$$

- działa po stronie częstotliwości
- ch-ka jest zapisywana w postaci tablicy (64 punkty)
- dodatkowo definiowany wsp. Wzmocnienia

- Klucz głosowy

- bazuje na obliczaniu wartości RMS energii
- załącza algorytmy przetwarzania tylko, gdy energia przekracza określony poziom

Dodatkowe algorytmy

- Korekcja barwy
 - wykorzystuje wartości tłumienia dla 16 pasm (począwszy od składowej stałej co ok. 500Hz) zapisane w tablicy
 - po skompilowaniu programu tablica wartości tłumień przenoszona jest do pamięci
 - kształtowanie widma jest wykonywane poprzez wymnożenie wartości składowych sygnału w poszczególnych pasmach przez współczynniki odczytane z tabeli

Dodatkowe algorytmy

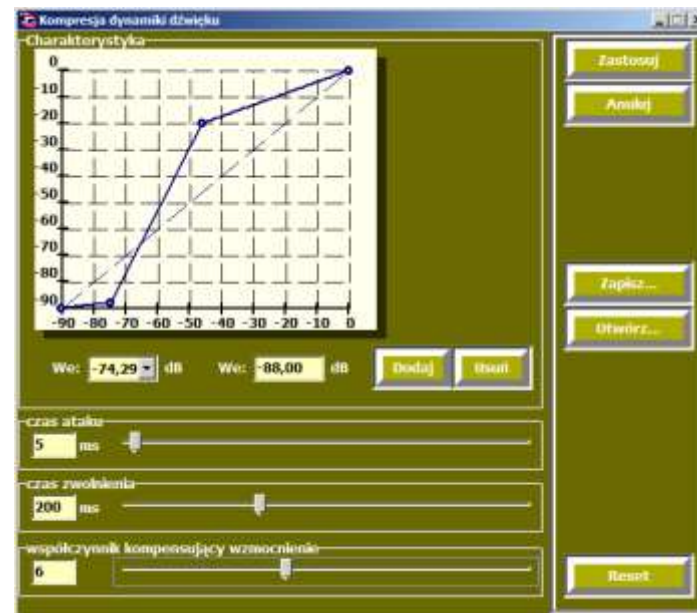
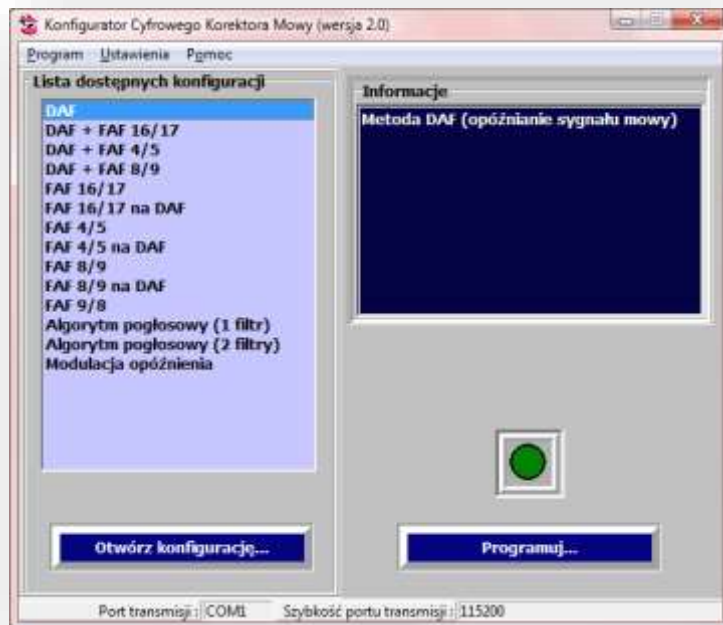
- Regulacja głośności
 - wykorzystanie konwertera analogowo-cyfrowy (LSAD) wbudowanego w procesor
 - wartość odczytana z konwertera staje się wskaźnikiem tablicy wartości
 - tablica wartości umieszczona jest w pamięci P i zawiera 32 współczynniki
 - tłumienie sygnału odbywa się w granicach od 0dB do -30dB
 - odbywa się na próbkach już przetworzonych przez procesor WOLA, po wystąpieniu przerwania WOLA_ISR
 - odpowiednie próbki są odczytywane z wyjściowego bufora FIFO, a ich wartość jest przemnażana przez wartość odczytaną z tablicy
 - przemnożone próbki wracają w odpowiednie miejsce w buforze wyjściowym i mogą być przekazane do receivera

Dodatkowe algorytmy

- Testowanie stanu baterii
 - realizowane poprzez przerwanie z timera występujące cyklicznie co ok. 366ms
 - przy każdym wystąpieniu przerwania następuje „spróbkowanie” wartości napięcia baterii i porównanie go z wartością progową wynoszącą domyślnie 1,1V
 - w przypadku, gdy napięcie jest niższe od tej wartości, następuje dodawanie do sygnału mowy sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 2kHz
 - dodawanie sygnału sinusoidalnego odbywa się równocześnie z regulacją głośności
 - sygnał sinusoidalny jest stabilizowany (dwa okresy dla częstotliwości próbkowania 16kHz) i umieszczany w pamięci Y

Programowanie urządzenia

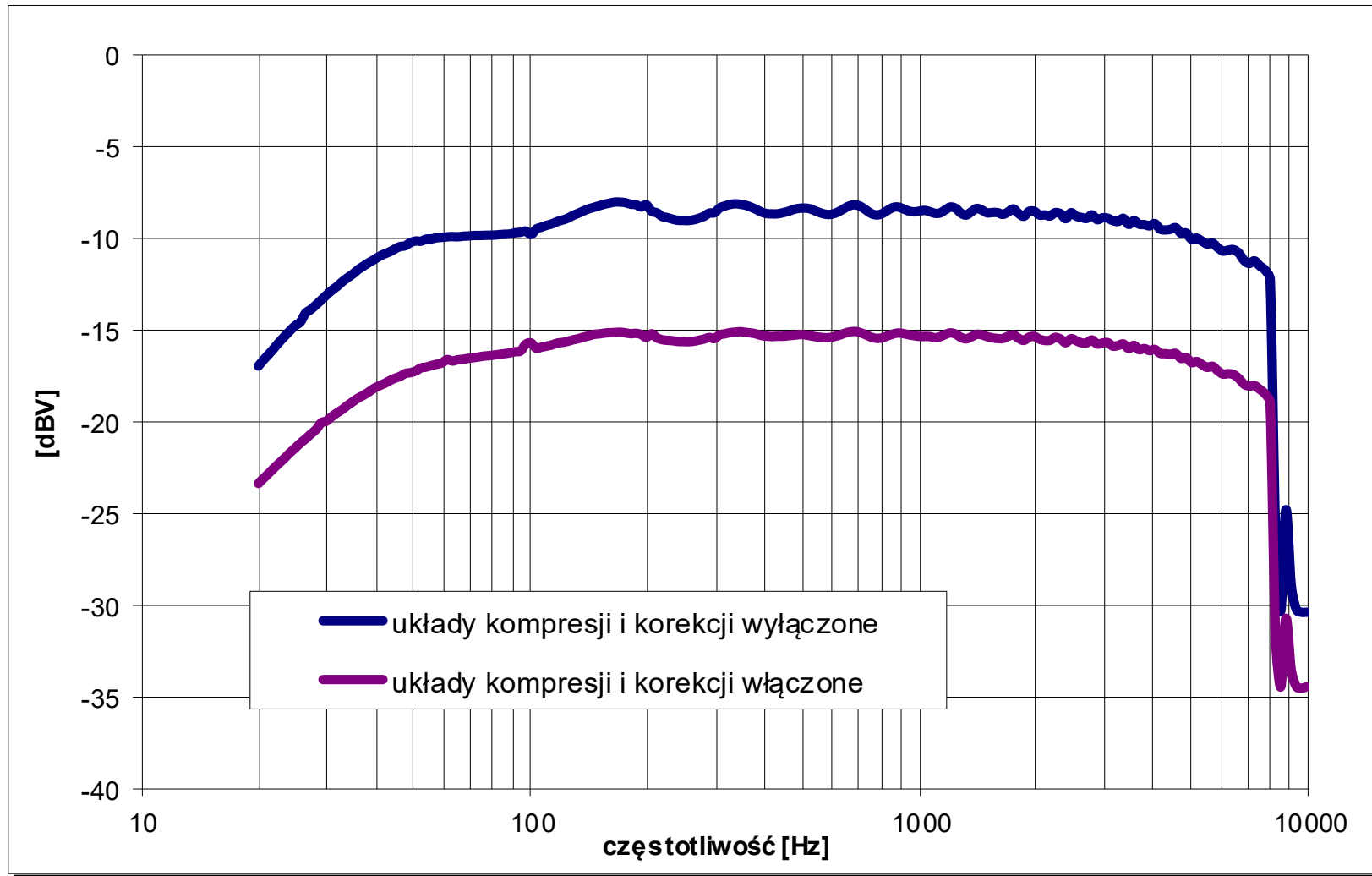
- zmiana parametrów z poziomu komputera PC
 - przystawka podłączana do portu szeregowego komputera
 - dodatkowe oprogramowanie
 - umożliwia zmiany wszelkich parametrów korektora
 - wstępne ustawienia dobrane na podstawie eksperymentów



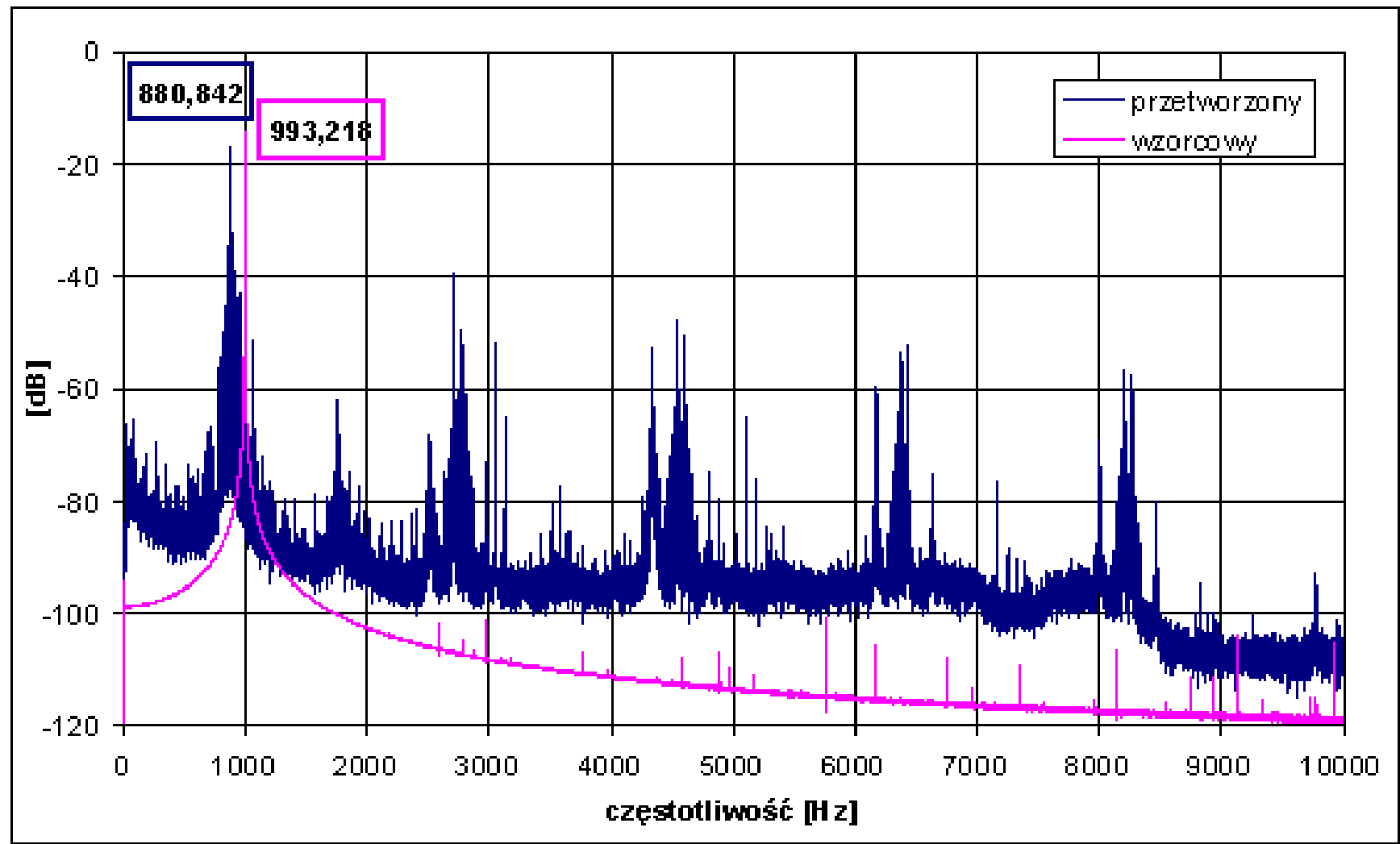
Pobór prądu

PROGRAM	TYPOWY POBÓR PRĄDU [μ A]	MAKSYMALNY POBÓR PRĄDU [μ A]
zmodyfikowany algorytm DAF –bez korekcji mowy, z wyłączonym kompresorem, korekcją barwy i kluczem głosowym, częst. zegara 1,28MHz	200	800
zmodyfikowany algorytm DAF –bez korekcji mowy, z wyłączonym kompresorem, korekcją barwy i kluczem głosowym, częst. zegara 1,92MHz	230	
zmodyfikowany algorytm DAF –bez korekcji mowy, ale z wyłączonym kompresorem i korekcją barwy, częst. zegara 1,92MHz	310	
typowy algorytm DAF	330	
typowy algorytm FAF (niezależnie od wielkości przesunięcia mowy)	320	
algorytm modulacji opóźnienia	330	
algorytm pogłosu (wersja z dwoma filtrami grzebieniowymi)	330	

Ch-ki przenoszenia



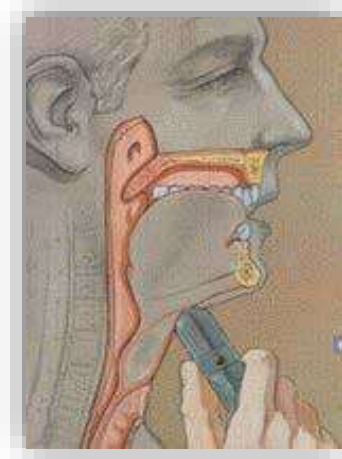
Algorytm FAF



Cyfrowa Krtań Elektroniczna

Sztuczna krtąń

- zawiera wyłącznie elementy elektromechaniczne – generator impulsów oraz cewkę z nurnikiem uderzającym w membranę
- generowane drgania są wprowadzane do jamy ustnej i gardła poprzez przyłożenie urządzenia do skóry szyi
- na mowę nałożony jest szum (warkot) urządzenia, co negatywnie wpływa na jej zrozumiałość. Mowa brzmi przy tym bardzo sztucznie i monotonna. W efekcie zrozumiałość mowy szacuje się na ok. 60%.



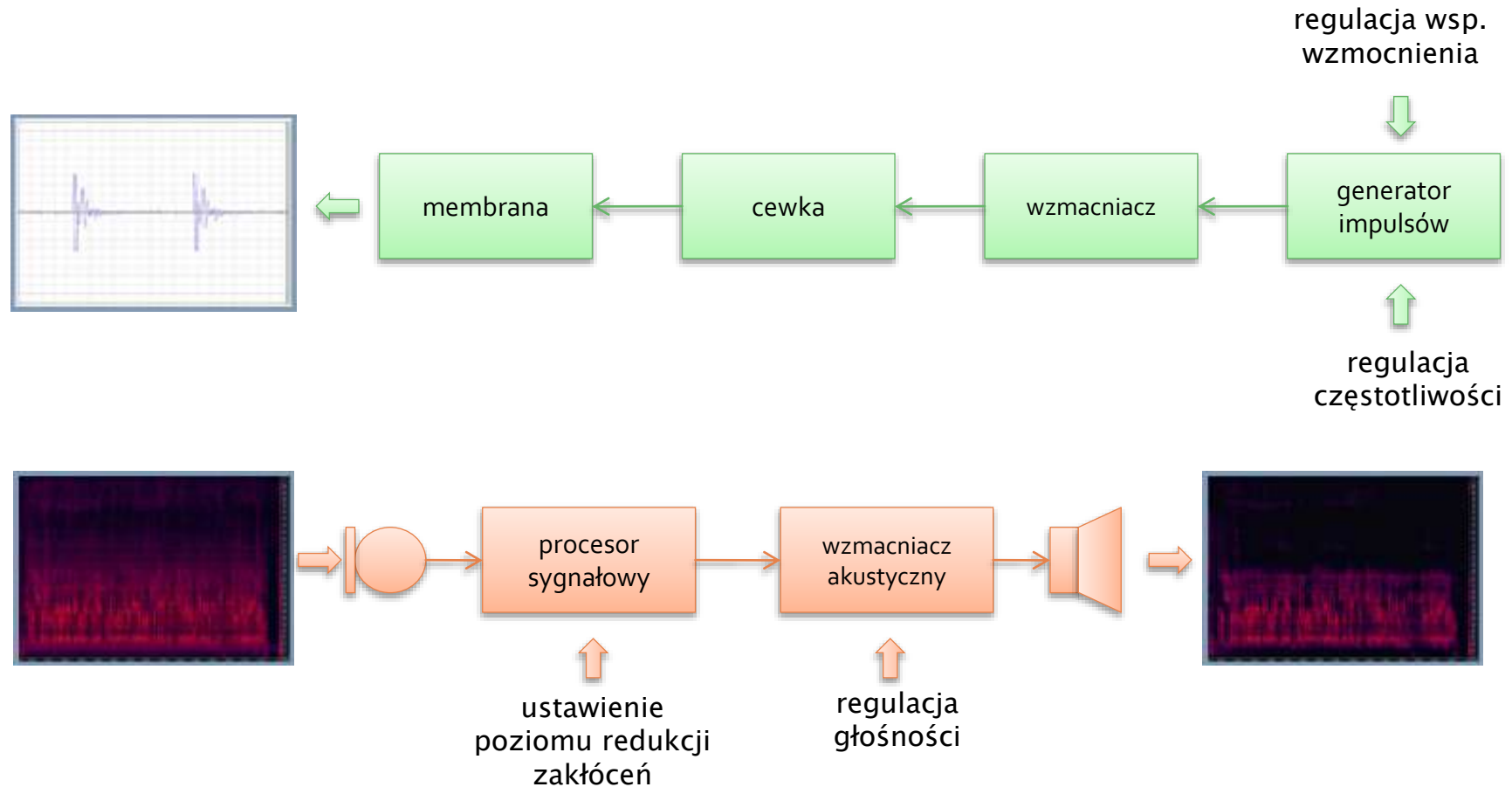
Cyfrowa Krtań Elektroniczna

- dzięki zastosowaniu cyfrowego przetwarzania sygnałów możliwe jest zredukowanie poziomu zakłóceń i poprawa jakości generowanej mowy



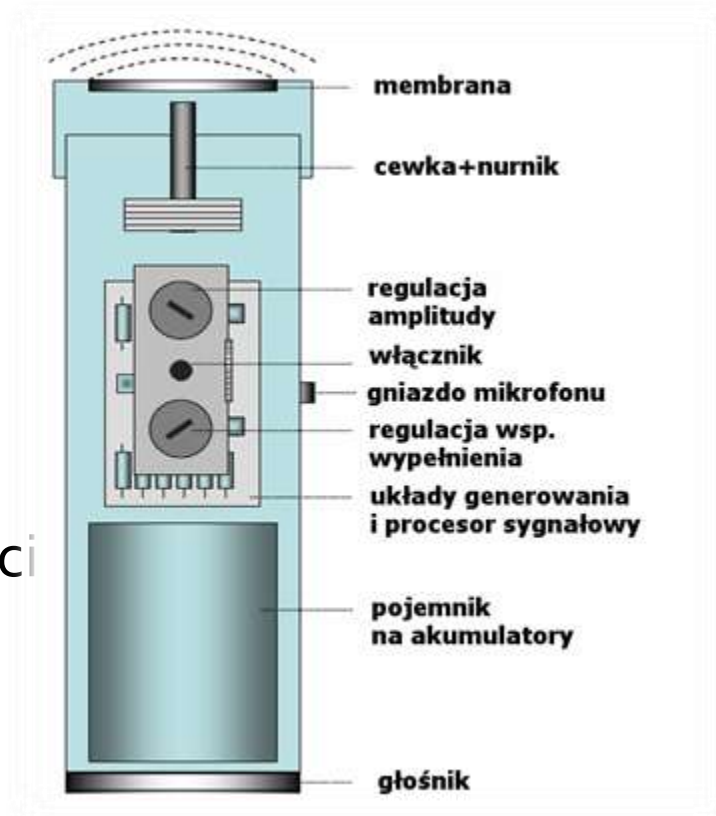
Cyfrowa Krtań Elektroniczna

Schemat blokowy:



Cyfrowa Krtań Elektroniczna

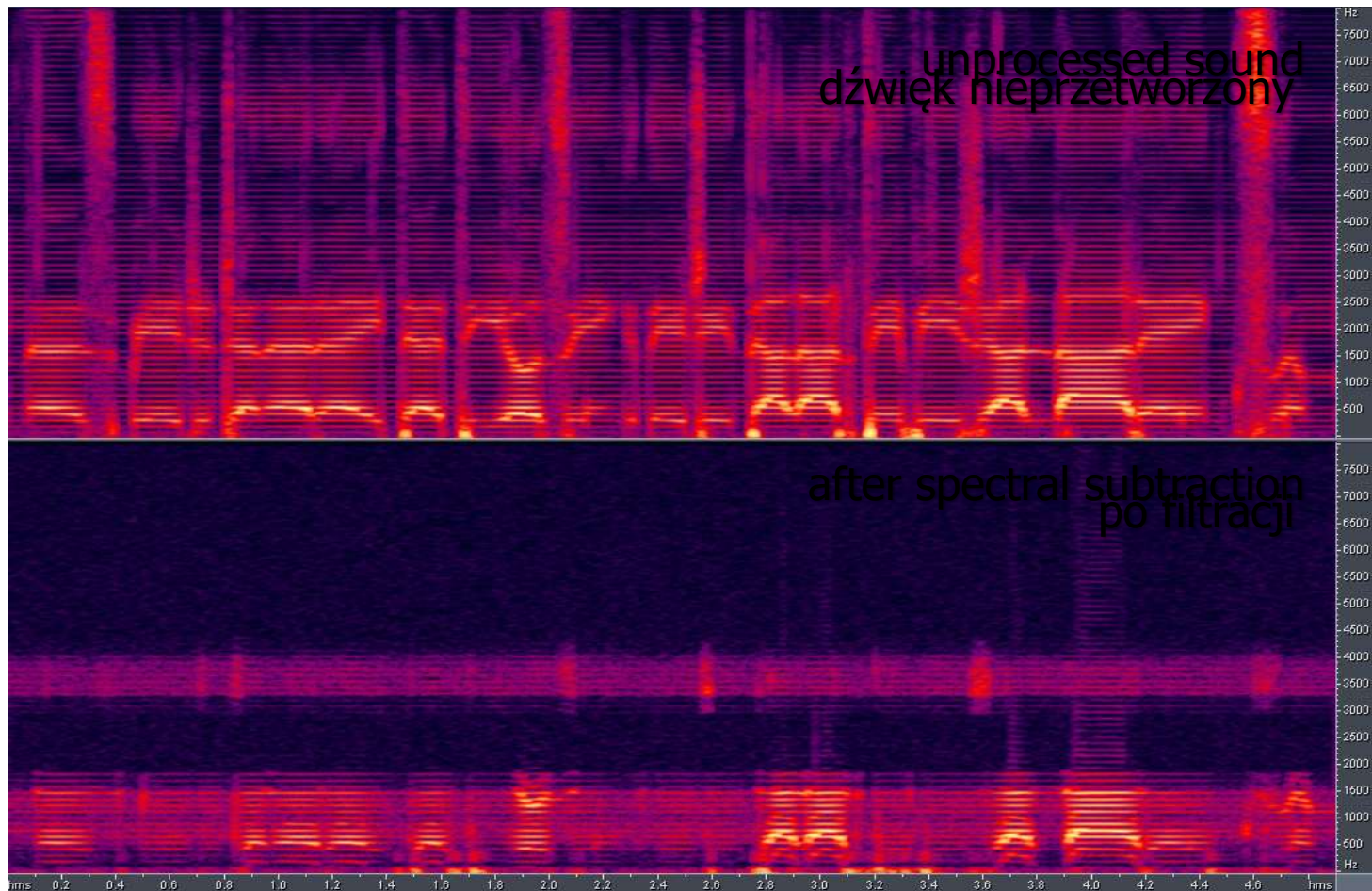
- Zastosowane algorytmy:
 - **redukcja warkotu wibratora**
 - odejmowanie widmowe
 - filtracja grzebieniowa
 - **eliminacja sprzężeń zwrotnych**
 - modulacja opóźnienia - wprowadza wolnozmienną modulację częstotliwości
 - transpozycja widmowa – przesuwamowę na skali częstotliwości



Odejmovanie widmowe

- parametry procesora:
 - częstotliwość zegara: **1.28MHz**;
 - częstotliwość próbkowania: **10.7kHz**;
 - liczba podpasm: **64** (128 points FFT);
 - rozdzielczość częstotliwościowa wynosi ok. **83Hz**.

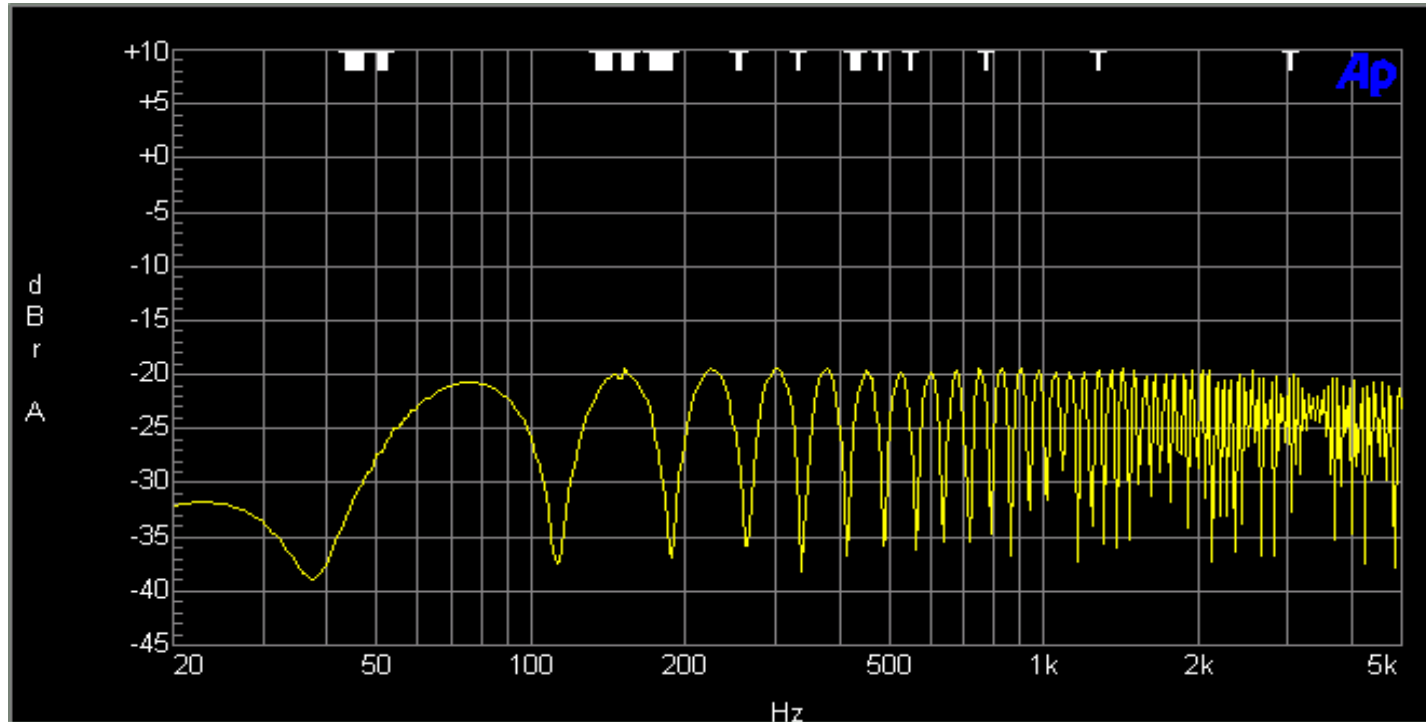
Odejmowanie widmowe



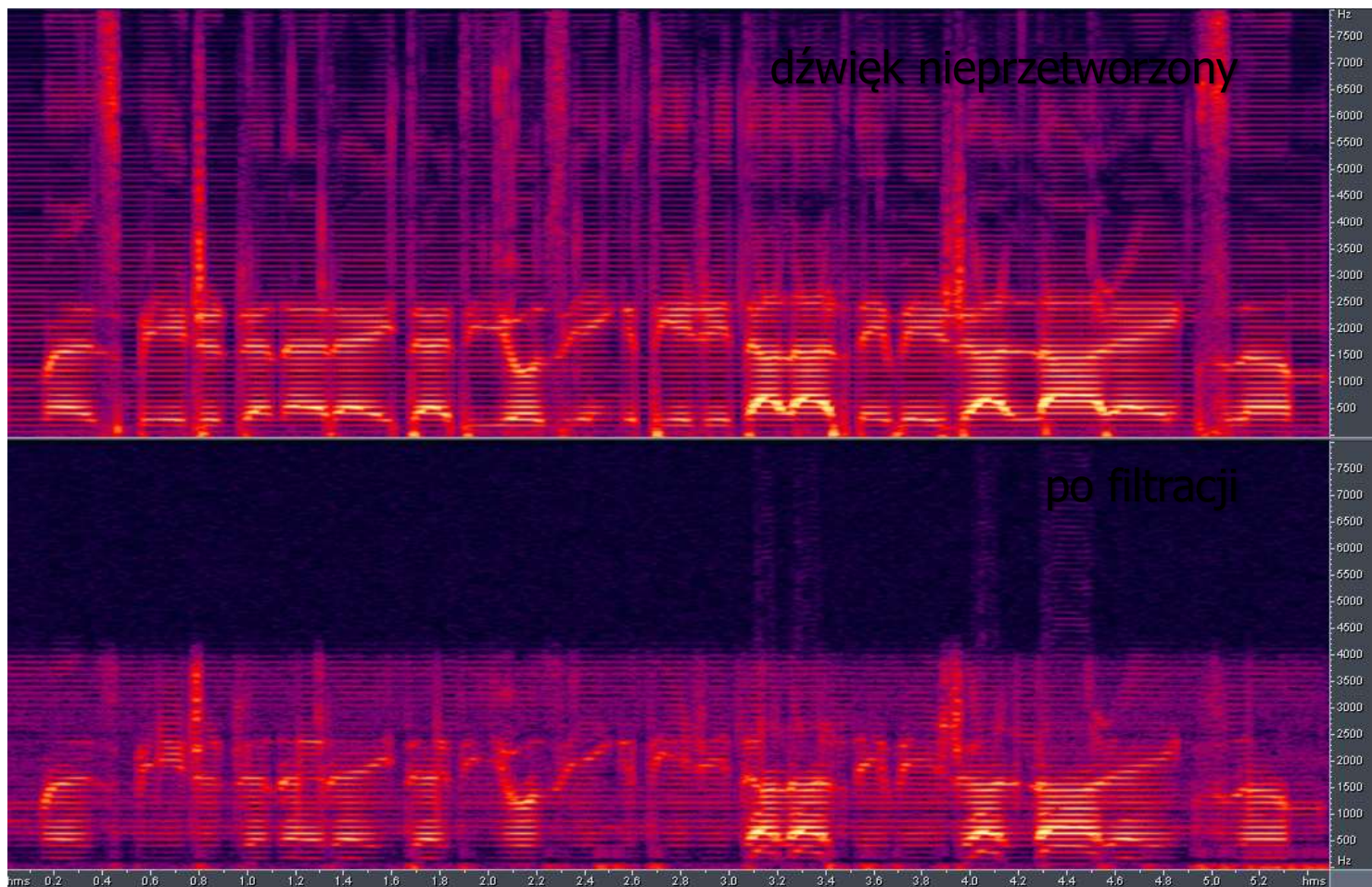
Filtracja grzebieniowa

- prostszy algorytm
- charakterystyka widmowa filtru umożliwia precyzyjne wstrojenie się w maksima sygnału zakłócającego
- główna zaleta: nie jest konieczne estymowanie widma zakłóceń, więc pacjent może mówić natychmiast po włączeniu urządzenia

Filtracja grzebieniowa



Filtracja grzebieniowa



Eliminacja sprzężenia zwrotnego

- problem ze sprzężeniami zwrotnymi
 - niewielka odległość między mikrofonem i głośnikiem (ok. 15-20cm)
- testowane rozwiązania
 - filtr typu notch
 - modulacja opóźnienia
 - transpozycja widmowa

Eliminacja sprzężenia zwrotnego

- filtr typu notch
 - brak możliwości wprowadzenia adaptacji - niewystarczające możliwości obliczeniowe procesora
- modulacja opóźnienia
 - wprowadza minimalne zmiany częstotliwości dźwięk
 - sygnał modulujący - sinus
 - okres sygnału modulującego: 1,5 s, średnie opóźnienie: 30-35 ms
zakres zmian opóźnienia: +/-4 ms
- transpozycja widmowa
 - zbliżona do metody FAF
 - wielkość transpozycji: 6% w dół oktawy

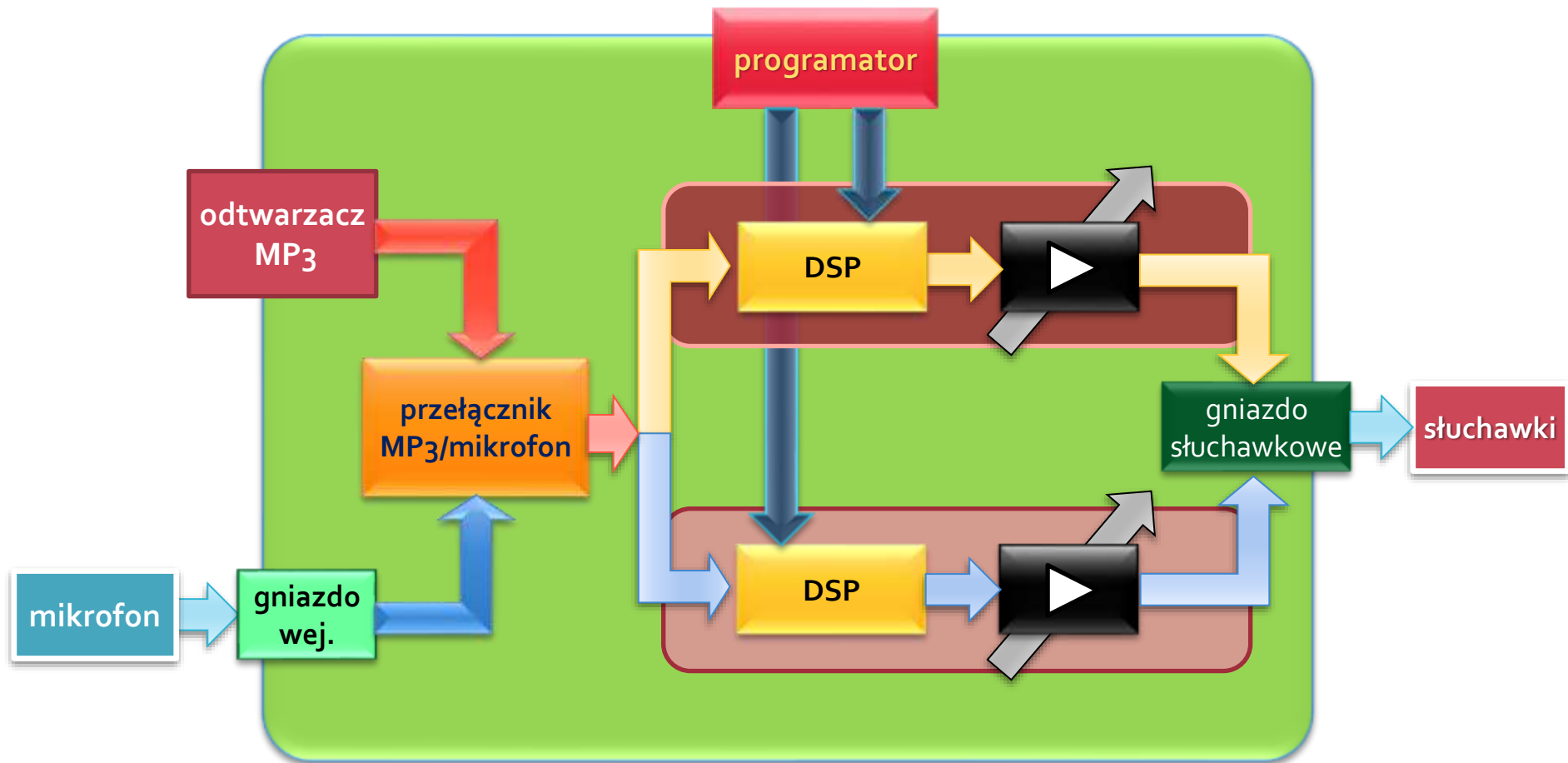
Urządzenie kieszonkowe

Cel

- opracowanie niewielkich rozmiarów urządzenia pozwalającego na stosowanie różnych algorytmów przetwarzania dźwięku



Schemat blokowy



Prototyp

gniazdo
mikrofonowe

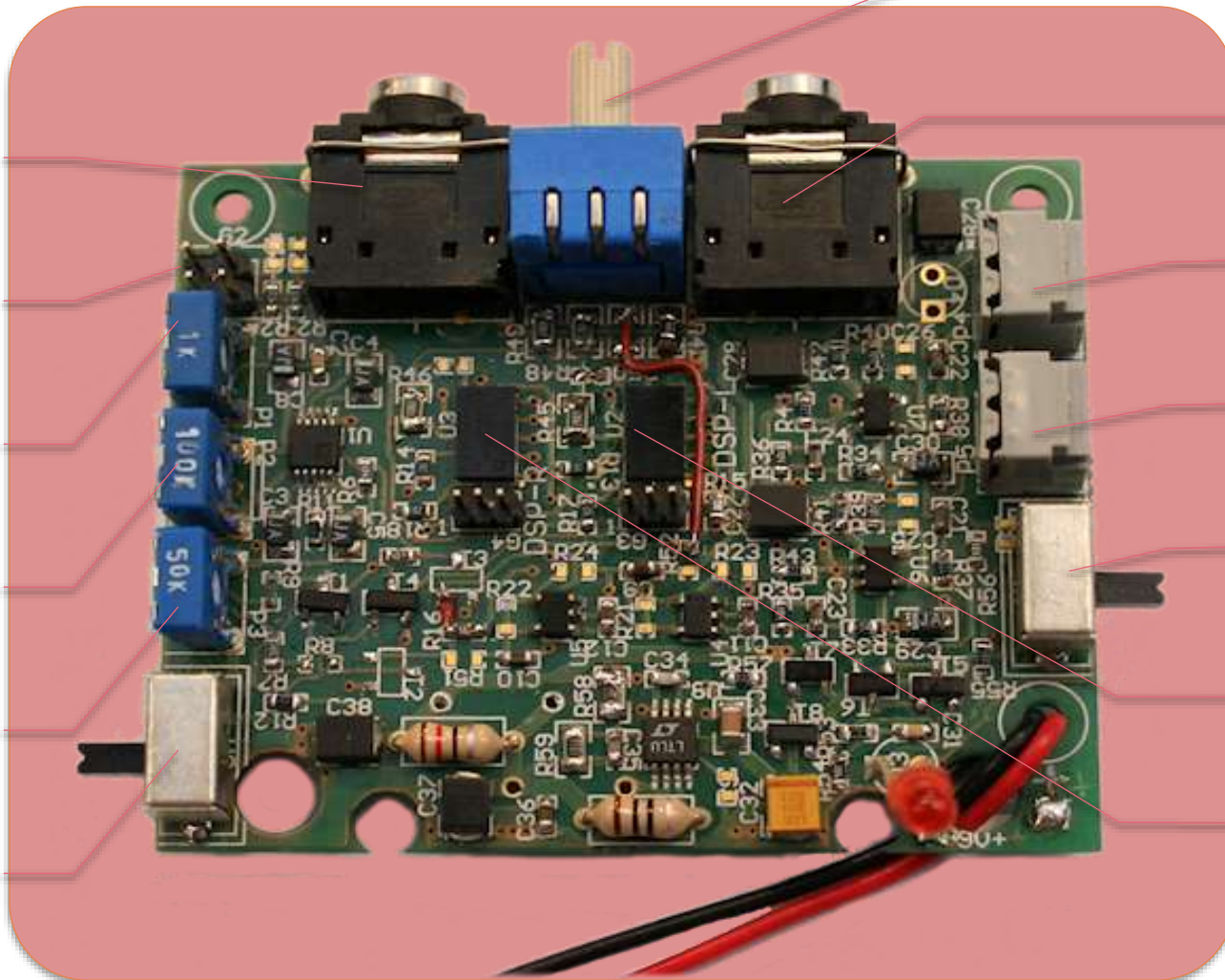
wejście odtwa-
rzacza MP3

regulacja wzm.
(wej. z MP3)

regulacja klucza
głosowego

regulacja wzm.
(wej. mikr.)

przetwornik
MP3/mikrofon



programator

gniazdo
słuchawkowe

regulacja wzm.
(kanał lewy)

regulacja wzm.
(kanał prawy)

włącznik

procesor
(kanał lewy)

procesor
(kanał prawy)

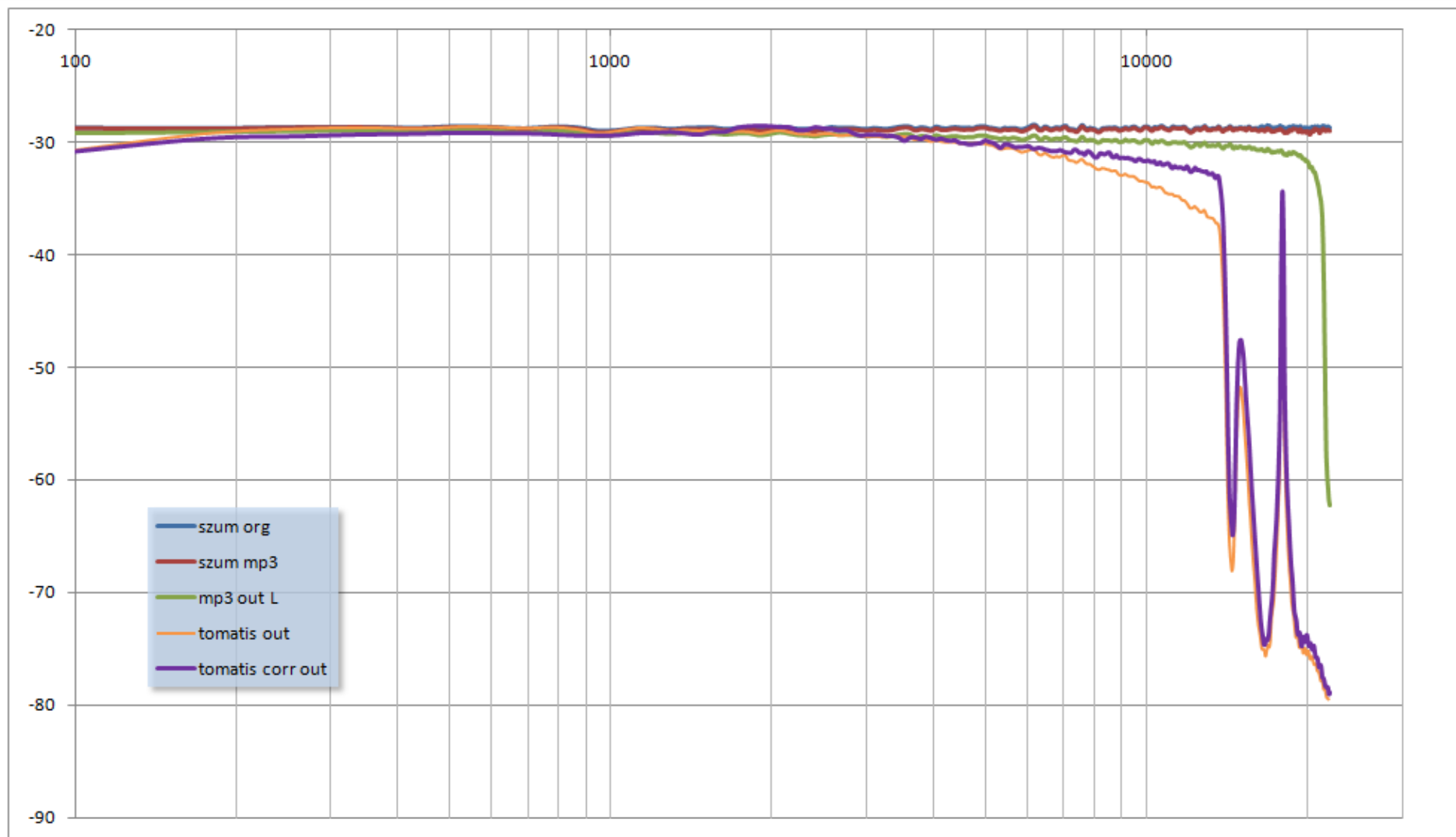
Programy

- wybór programów za pomocą 16-to pozycyjnego przełącznika
- przełącznik steruje drabinką rezystorów
- zmiana programów z wykorzystaniem
 - wolnozmiennego przetwornika wbudowanego w Toccatę
 - przełącznika (SW₂)
- możliwość przełączenia źródła sygnału (mikrofon/MP₃)
 - wykorzystany przełącznik SW₁

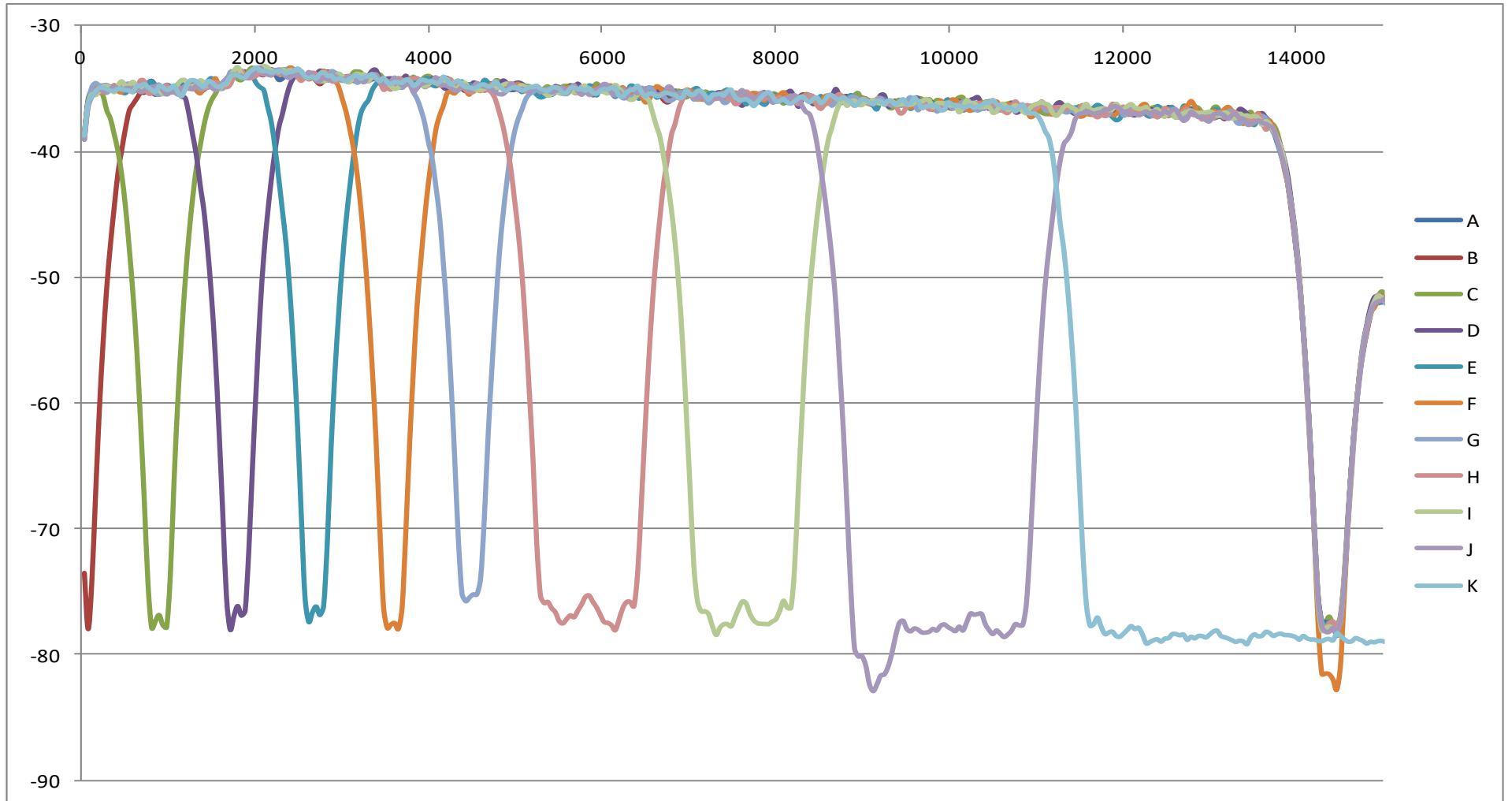
Parametry

- procesor
 - częstotliwość pracy zegara: 2,56MHz
 - częstotliwość próbkowania: 29kHz
 - pasmo: ok. 14kHz
 - analiza FFT: 32 punkty
- **pobór prądu całego urządzenia: 2,5mA**

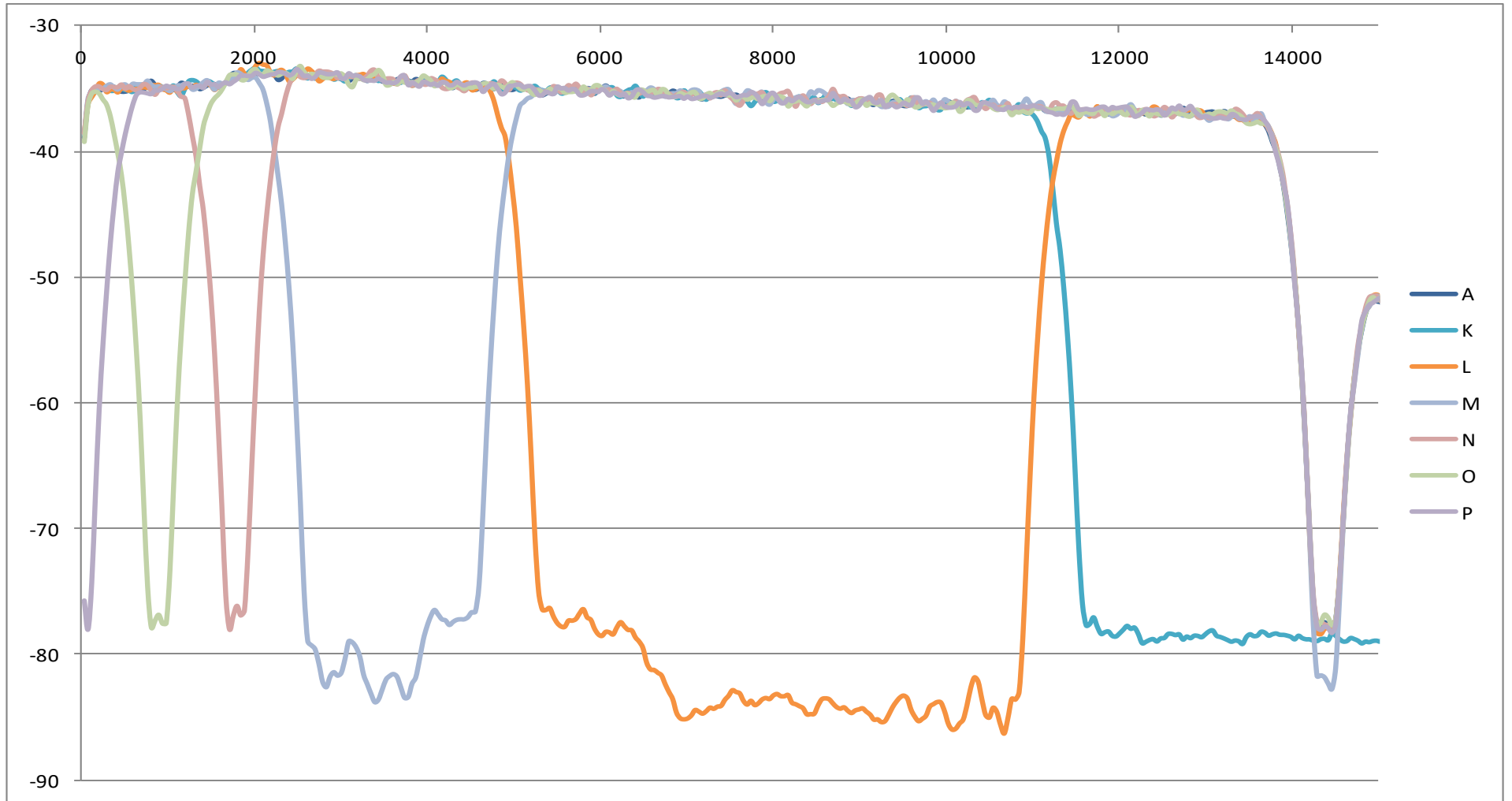
Parametry toru



Parametry toru



Parametry toru



Aparat w oprawce okularów

Obudowa

- Kompletny aparat słuchowy montowany w oprawce okularów Contact Star EVO₁ firmy BHM

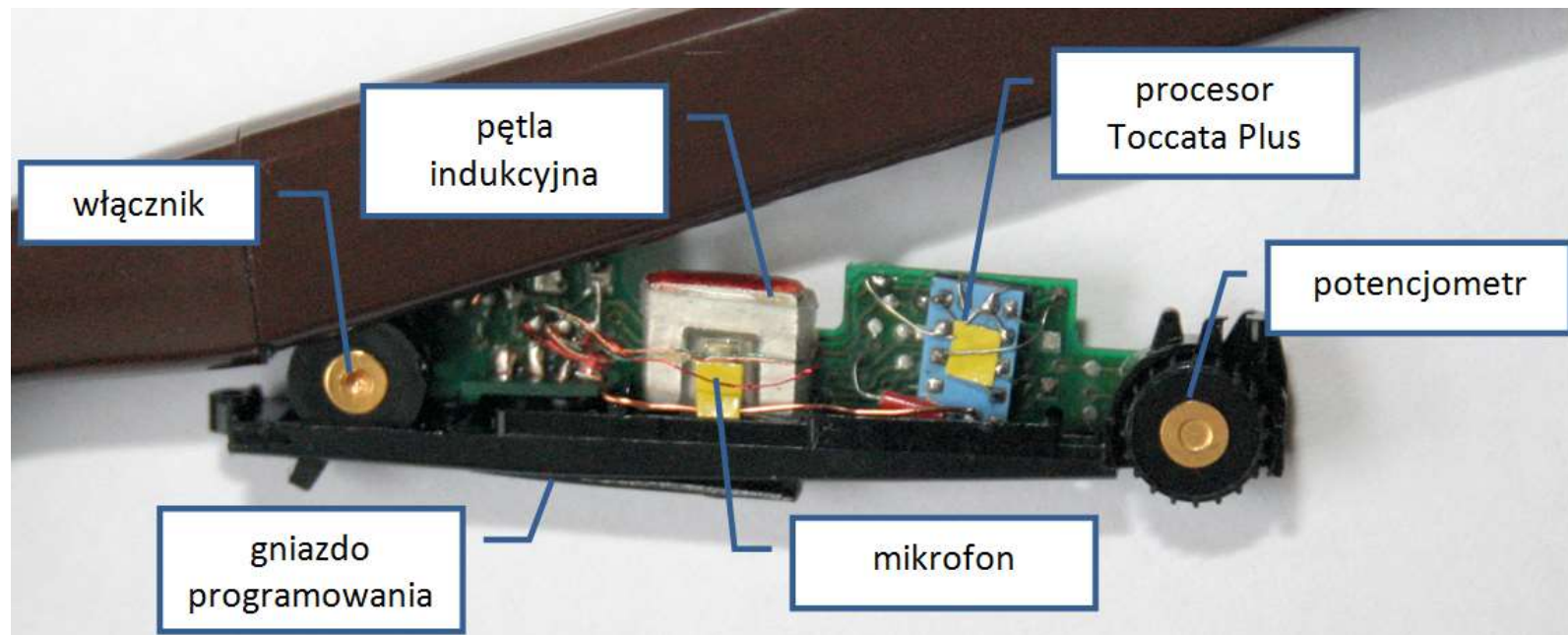


Konstrukcja



Problemy

- producent okularów założył użycie we wbudowanym w zauszniak aparacie procesora DSP GA3216 firmy Gennum Corporation
- konieczne było przystosowanie elektroniki wbudowanego aparatu słuchowego do procesora Toccata Plus



Spowalnianie mowy

Założenia

- Spowalnianie mowy w czasie rzeczywistym
 - potrzebna duża ilość pamięci – trzeba na bieżąco buforować mowę
 - algorytm zbliżony do FAF-u
 - wyłączenie wszystkich dodatkowych algorytmów przetwarzania sygnału
 - korekcja barwy
 - procesor dynamiki
 - teoretycznie możliwość przywrócenia bez większego wpływu na algorytmy spowalniania

Parametry

- procesor
 - częstotliwość pracy zegara: 1,28MHz
 - częstotliwość próbkowania: 10,667 kHz
 - wielkość buforów
 - pamięć X – 3584 próbki (335ms)
 - pamięć Y – 3584 próbki (335ms)
 - pamięć P – 10752 próbki (1005ms)
- problem: obsługa pamięci P jest dwukrotnie wolniejsza niż pamięci X i Y

Spowalnianie

- proste eliminowanie fragmentów ciszy – zmodyfikowany klucz głosowy
- praca na ramkach o długości 512/1024 próbek
- zakładkowanie z liniowym przemieszczeniem
 - np. spowolnienie o 12,5% dla ramki 512 próbek i zakładki 64 próbki



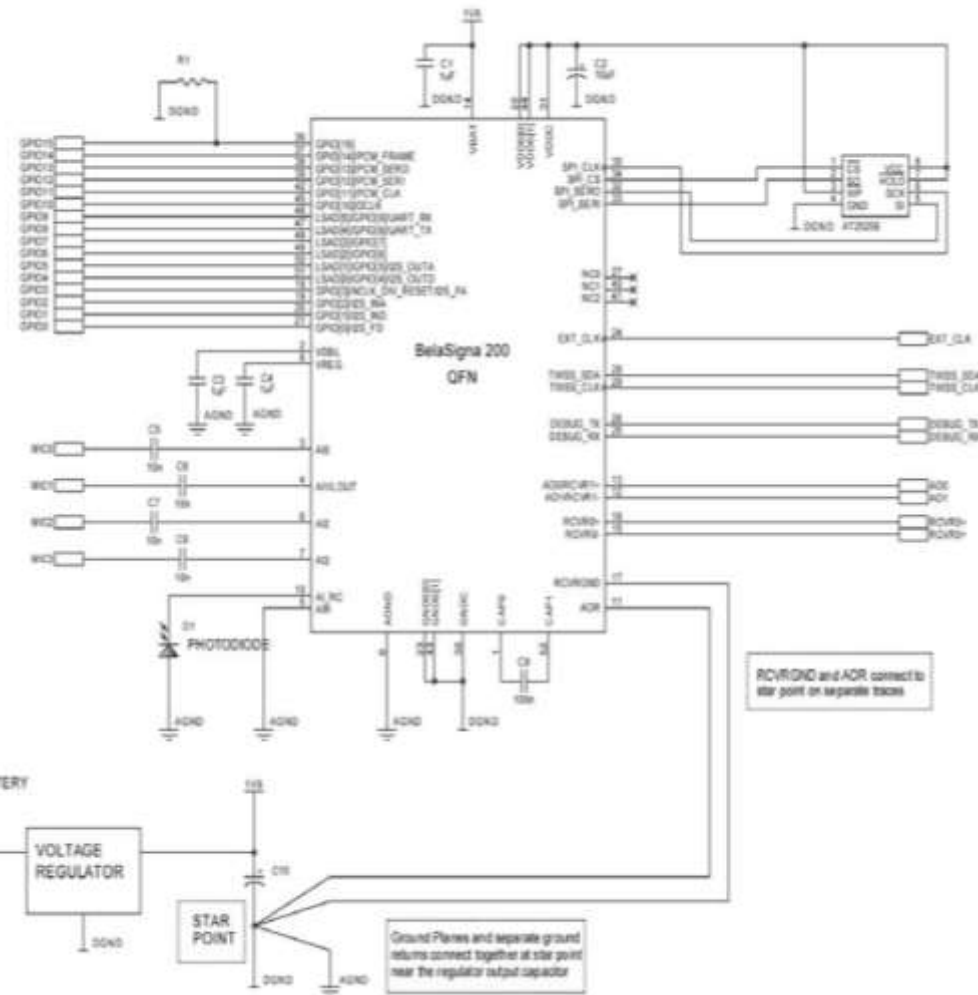
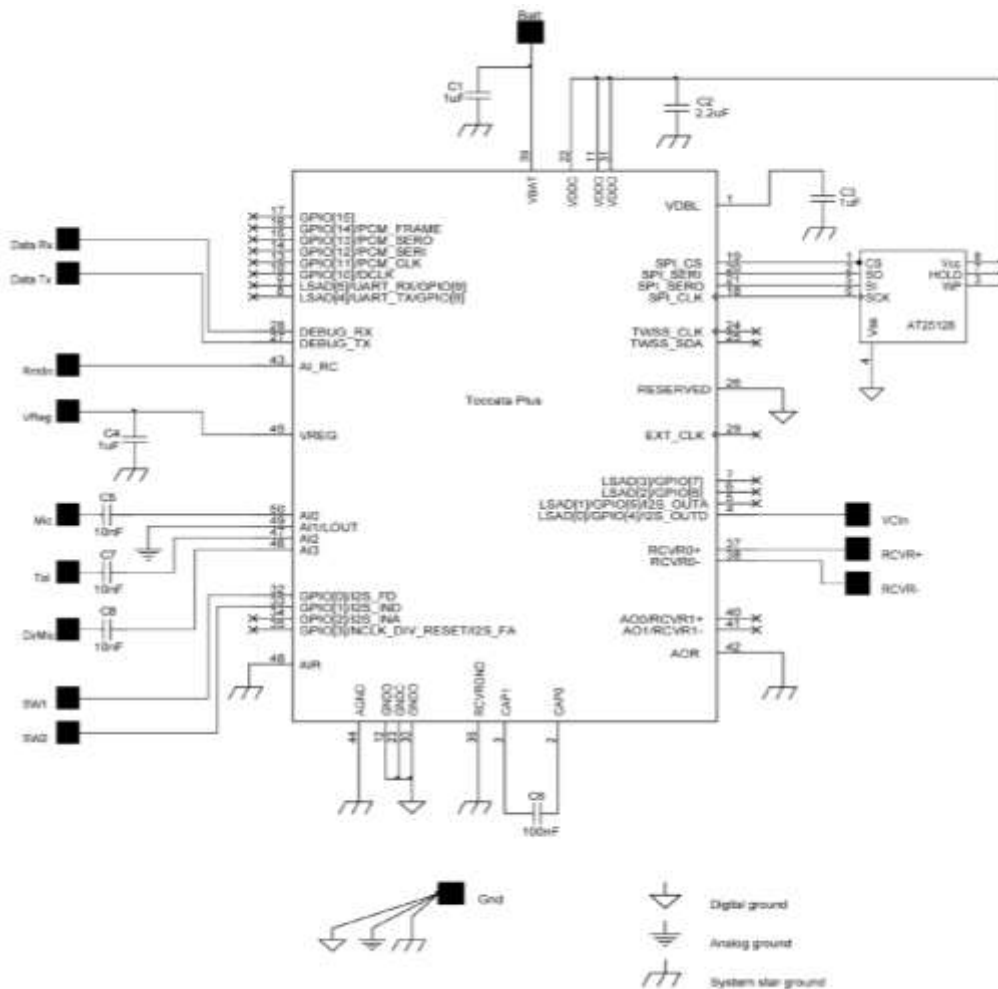
Podsumowanie

Inne procesory

- <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/parametrics.do?id=2210>

Select	Product	Data Sheet	Compliance	Status	Description	DSP Core (bits)	Coprocessor Type	MIPS	Dynamic Range (dB)	RAM (kB)	I _{standby} Typ (μA)	Audio Inputs	Audio Outputs	Package Type
	BELASIGNA 200		Pb-free Halide free	Active	Single-Chip Audio Processing System	16	WOLA	40	83	42	250	2	2	NQFP-52 WLCSP-40
	BELASIGNA 250		Pb-free	Active	16 bit Audio Processor, Full Stereo 2-in, 2-out	16	WOLA	60	88	42	50	2	2	LFBGA-57 LFBGA-64
	BELASIGNA 300		Pb-free Halide free	Active	24 bit Audio Processor for Portable Communication Devices	24	HEAR	240	110	110	40	4	1	DFN-44 WLCSP-35
	BELASIGNA R261		Pb-free Halide free	Active	Advanced Noise Reduction Solution for Voice Capture Devices	16	WOLA	60	88		40	2	2	WLCSP-26 WLCSP-30
	BELASIGNA R262		Pb-free Halide free	Active	Wideband Voice Capture and Noise Reduction SoC	16	WOLA	60	88		40	2	2	WLCSP-26 WLCSP-30
	LC823430TA		Pb-free Halide free	Active	Audio Processing System for MP3 Recording and Playback	32		60				2	2	TQFP-128 / TQFP-128L

Procesor Belasigna 200



Dziękuję za uwagę

KONIEC