



**PAŃSTWOWA WYŻSZA SZKOŁA ZAWODOWA W TARNOWIE**

WYDZIAŁ POLITECHNICZNY

ELEKTRONIKA I TELEKOMUNIKACJA

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Wykrywacz metali w technologii VLF

Autor: Patryk Nytko

Kierunek studiów: Elektronika i Telekomunikacja

Opiekun pracy: dr. inż. Robert Wielgat

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp i zakres pracy
    - 1.1 – Wstęp – 3
    - 1.2 – Cel i zakres pracy – 4
  2. Opis fizyczny i ogólna zasada detekcji metalu
    - 2.1 – Opis fizyczny detekcji metalu - 5
    - 2.2 – Zjawisko prądów wirowych - 5
    - 2.3 – Zjawisko efektu naskórkowości - 7
  3. Opis wybranych typów wykrywaczy metali
    - 3.1 - BFO (Beat Frequency Oscillator) - 8
    - 3.2 - PI (Pulse Induction) - 9
    - 3.3 - IB (Induction Balance) – 10
  4. Cechy budowanego urządzenia i schemat ideowy
    - 4.1 – Cechy urządzenia - 12
    - 4.2 – Schemat blokowy - 13
  5. Konstrukcja urządzenia
    - 5.1 - Mikrokontroler wraz połączeniami - 14
    - 5.2 - Układy zasilania i zabezpieczeń - 17
    - 5.3 – Wyświetlacz LCD 2x16 - 19
    - 5.4 - Układ przycisków/sterowania - 19
    - 5.5 - Układ nadajnika dla cewki nadawczej Tx - 20
    - 5.6 - Układ odbiornika cewki Rx i konektora sondy - 23
    - 5.7 – Układ pamięci EEPROM – 25
    - 5.8 – Układ nadajnika FM - 26
    - 5.9 – Tor audio wykrywacza - 27
    - 5.10 – Dioda diagnostyczna - 29
    - 5.11 – Interfejs programatora – debuggera – 29
  6. Procedura wykonania cewki
    - 6.1 – Procedura wykonania sondy pomiarowej – 31
    - 6.2 – Dodatkowa konfiguracja cewek – sonda statyczna - 37
  7. Software i opis działania
    - 7.1 – Wgrywanie software’u – 38
      - UART - 38
      - SWD – 38
    - 7.2 – Ekran główny – 39
    - 7.3 – Opis funkcji software’u - 40
  8. Testy urządzenia
    - 8.1 – Kalibracja urządzenia - 45
    - 8.2 – Test kąta fazowego - 45
    - 8.3 – Test głębokości – 46
    - 8.4 – Test głębokości dla wersji z platformą - 47
  9. Podsumowanie - 48
- Bibliografia - 49

# 1. WSTĘP I ZAKRES PRACY

## 1.1 - Wstęp

Detekcja metali znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach życia takich jak przemysł, bezpieczeństwo, wojskowość, medycyna czy wykrywanie hobbystyczne. W kwestii różnorodności technologii wykrywania metali zasadniczo nie ma wielkiego wyboru. Wciąż spotyka się rozwiązania oparte o historycznie najstarszą metodę Beat Frequency Oscillator (BFO), Pulse Induction (PI) i metody oparte na IB (Induction Balance), które jest obecnie technologią wiodącą na rynku. Istnieje jeszcze kilka innych, pomniejszych technologii, które stanowią pochodną lub syntezę powyższych.

Pierwsze wzmianki dotyczące wykrywaczy metali datuje się na koniec XIX wieku. W okresie tym nastąpił szybki rozwój elektrotechniki, oraz zaczęto dostrzegać związek prądu elektrycznego z polem magnetycznym. Badania prowadzone w tamtym czasie stały się podwaliną dla obecnych wykrywaczy metali. Istotnymi okazały się być spostrzeżenia Hansa Christiana Øersteda (1777-1851) który przypadkowo dostrzegł zależność między prądem płynącym w przewodzie, a poruszającą się w jego pobliżu igłą kompasu. Stwierdził on słusznie, że prąd tworzy pole magnetyczne. Jego badania zwróciły uwagę ówczesnego świata nauki w stronę elektrodynamiki.

Osobą szczególnie zasłużoną w dziedzinie elektryczności i magnetyzmu był Michael Faraday (1791-1867). Jednym z jego największych odkryć było opisanie zasady indukcji magnetycznej, czyli zjawiska polegającego na wytwarzaniu pola magnetycznego przez prąd płynący przez przewód. Dalsze prace naukowe w zakresie indukcji magnetycznej doprowadziły min. Do wynalezienia przez Dawida Edwarda Hughesa (1831-1900) systemu zbalansowanej indukcji (Induction Balance/IB), co w dalszym ciągu przyczyniło się do wynalezienia wykrywaczy VLF.

Jednym z pionierów był między innymi Alexander Graham Bell (1847-1922), który to użył skonstruowanego przez siebie wykrywacza w celu lokalizacji kuli w ciele postrzelonego prezydenta Jamesa Garfielda.

Wykrywanie metali do zastosowań militarnych dynamicznie rozwinęło się w trakcie drugiej wojny światowej. Na tym polu znaczący udział w projektowaniu wykrywaczy metali mieli polscy porucznicy - Józef Kosacki i Andrzej Garboś, którzy zaprojektowali zimą 1941 roku pierwszy wykrywacz min – Mark I.

Hobbystyczne wykrywanie metali, praktycznie nie istniało przed rokiem 1950. W tym czasie jedynym źródłem pozyskiwania wykrywaczy były nadwyżki wojskowe. Dwadzieścia lat później na rynek wkroczyły proste i niedrogi wykrywacze zbudowane na tranzystorach.

## 1.2 – Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbudowanie bloku elektroniki i sondy wykrywacza metali. W założeniu miały one posiadać cechy współczesnych, komercyjnych urządzeń.

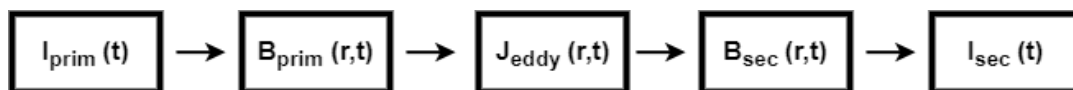
Zakres pracy obejmował:

- Przegląd literatury na temat wykrywaczy metali, techniki wiroprowadowej, publikacji naukowych i rozwiązań z for DIY
- Wybór schematu i typu sondy do zrealizowania
- Lutowanie elementów SMD i THT do płytki PCB
- Druk, grafitowanie, nawinięcie cewek, dobranie kondensatorów i zalanie żywicą sondy
- Połączenie powyższych elementów
- Testy urządzenia

## 2. OPIS FIZYCZNY I OGÓLNA ZASADA DETEKcji METALI

### 2.1 – Opis fizyczny detekcji metalu

Wykrywacz metali można opisać jako aktywne urządzenie, indukujące fale elektromagnetyczne o bardzo niskich (na ogół) częstotliwościach [3]. Wykrywacz, poprzez sondę zawierającą jedną lub więcej cewek przez które płynie zmienny w czasie prąd elektryczny, który można nazwać  $I_{\text{prim}}(r,t)$ , wytwarza odpowiednie, zmienne w czasie pole magnetyczne  $B_{\text{prim}}(r,t)$ , którego propagacja zgodna jest z ruchem sondy, domyślnie w kierunku obiektu metalowego. To właśnie pierwotne pole magnetyczne reaguje z właściwościami elektrycznymi lub/i magnetycznymi obiektu metalowego. Odpowiedź obiektu to zmodyfikowane pole pierwotne, które można nazwać wtórnym polem magnetycznym  $B_{\text{sec}}(r,t)$ . Pole to indukuje w części odbiorczej sondy napięcie elektryczne, które jest przetwarzane np. na sygnał dźwiękowy. Opisany proces zaprezentowano na rys. 2.1.



Rys. 2.1 – Podstawowy schemat działania wykrywacza metali, wielkość  $J_{\text{eddy}}$  symbolizuje prądy wirowe, zmienne  $r$  i  $t$  stanowią kolejno odległość i czas [3]

### 2.2 – Zjawisko prądów wirowych

Pole wtórne  $B_{\text{sec}}(r,t)$  jest spowodowane prądami wirowymi  $J_{\text{eddy}}(r,t)$ , które są indukowane przez pole pierwotne  $B_{\text{prim}}(r,t)$  na obiektach metalowych przewodzących. Wynika z tego faktu następująca konkluzja – metale o niższej przewodności, głównie stopy lub stal nierdzewna są trudniejsze do wykrycia, zaś ferromagnetyki, które cechuje wysoka wartość przenikalności magnetycznej  $\mu_r$  są do wykrycia łatwiejsze, dając wysokie wartości odpowiedzi wykrywacza. [3] Prądy wirowe są spowodowane zmiennym w czasie polem magnetycznym i podlegają prawu indukcji (prawo Faradaya), które można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi_B}{dt}$$

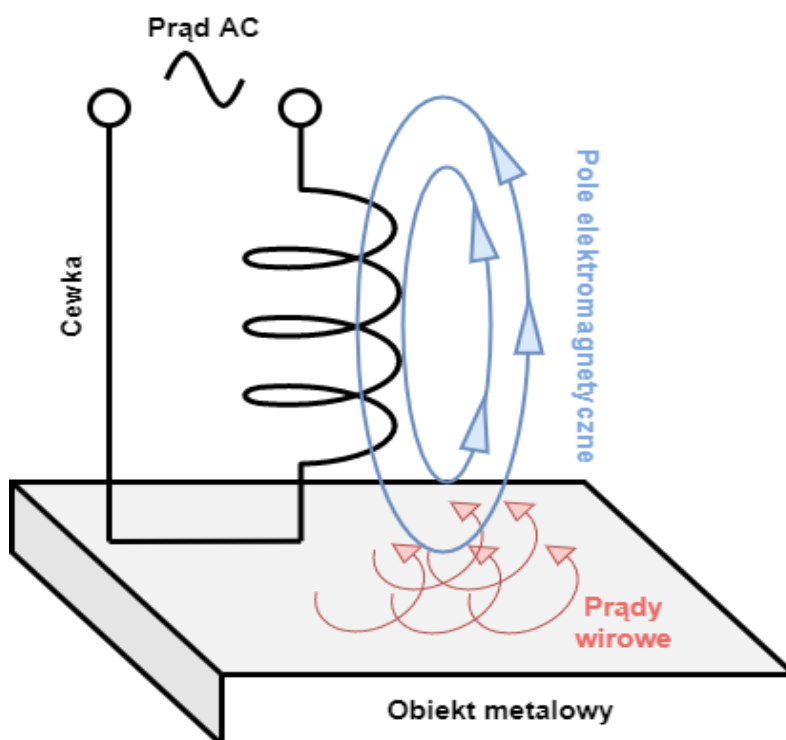
gdzie:  $\varepsilon$ - siła elektromotoryczna,  $\Phi_B$  – strumień indukcji magnetycznej

Strumień pola magnetycznego  $\Phi_B$  można wyrazić następująco:

$$\phi_B = \int_S B dS$$

gdzie:  $S$  – powierzchnia,  $B$  – indukcja magnetyczna

Detekcja metali opiera się o występowanie zjawiska prądów wirowych. Prąd wirowy jest prądem indukcyjnym, pojawiającym się wokół przewodnika, który znajduje się w zmiennym polu magnetycznym. Poniższy schemat obrazuje tworzenie się prądów wirowych po tym jak obiekt metalowy został wystawiony na ekspozycję zmiennego pola magnetycznego.



Rys. 2.2 – Graficzne przedstawienie tworzenia się prądów wirowych

### 2.3 – Zjawisko efektu naskórkowości

Prądy wirowe krążą głównie po powierzchni obiektu metalowego. Spowodowane jest to faktem występowanie tzw. efektu naskórkowego (skin effect). Polega on na tym, że pole elektromagnetyczne zanika w ośrodku przewodzącym i gęstość prądu przy powierzchni przewodnika jest większa niż w jego wnętrzu, zatem obiekty o większej przewodności będą posiadać większą wartość indukowanych przez siebie prądów wirowych. Kluczowym parametrem jest głębokość wnikania  $\delta$ . Prądy wirowe generują pole magnetyczne przeciwnie skierowane do pola pierwotnego co wynika z Prawa Lenza. Głębokość wnikania jest zależna od częstotliwości –  $f$ , przenikalności –  $\mu$  i konduktancji –  $\sigma$ , o czym świadczy poniższa zależność:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

gdzie:  $\mu = \mu_0$ ,  $\omega = 2\pi f$  (pulsacja kątowna)

### 3. OPIS WYBRANYCH TYPÓW WYKRYWACZY METALI

Powyższy rozdział obejmuje opis trzech najbardziej typowych [1] technologii w jakich są wykonywane wykrywacze metalu. Zaprezentowane tutaj rozwiązania są tylko przykładami dla poszczególnych technik. Często schematy blokowe są zmodyfikowane i rozwiązane w inny sposób.

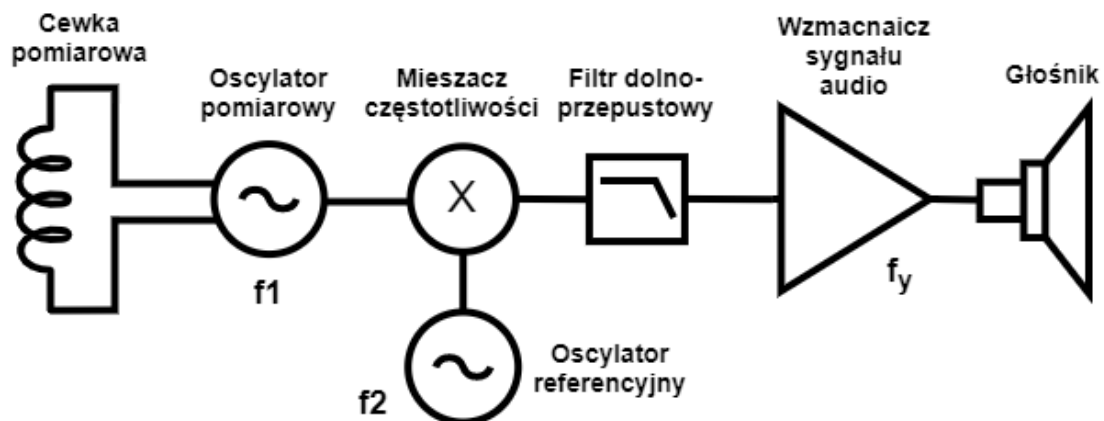
#### 3.1 - BFO (ang. Beat Frequency Oscillator) – wykrywacz zdudnieniowy

Jego działanie polega na mieszaniu sygnału oscylatora pomiarowego -  $f_1$ , z sygnałem oscylatora referencyjnego –  $f_2$  (stanowiącego wzorzec). W wyniku tych operacji otrzymujemy dwie częstotliwości, nazwane tutaj  $f_x$  i  $f_y$ .

$$f_x = f_1 + f_2$$

$$f_y = f_1 - f_2$$

Częstotliwość wyższa -  $f_x$ , odcięta jest przez filtr dolnoprzepustowy, zaś częstotliwość niższa –  $f_y$ , trafia do wzmacniacza audio. Jeżeli w zasięgu cewki tzn. w emitowanym przez nią polu elektromagnetycznym pojawi się obiekt metalowy, dochodzi do zaburzenia częstotliwości oscylatora pomiarowego. Zmiana ta powoduje sygnalizację obiektu z pomocą sygnału akustycznego.



Rys. 3.1 – Schemat blokowy typowego wykrywacza BFO [1]

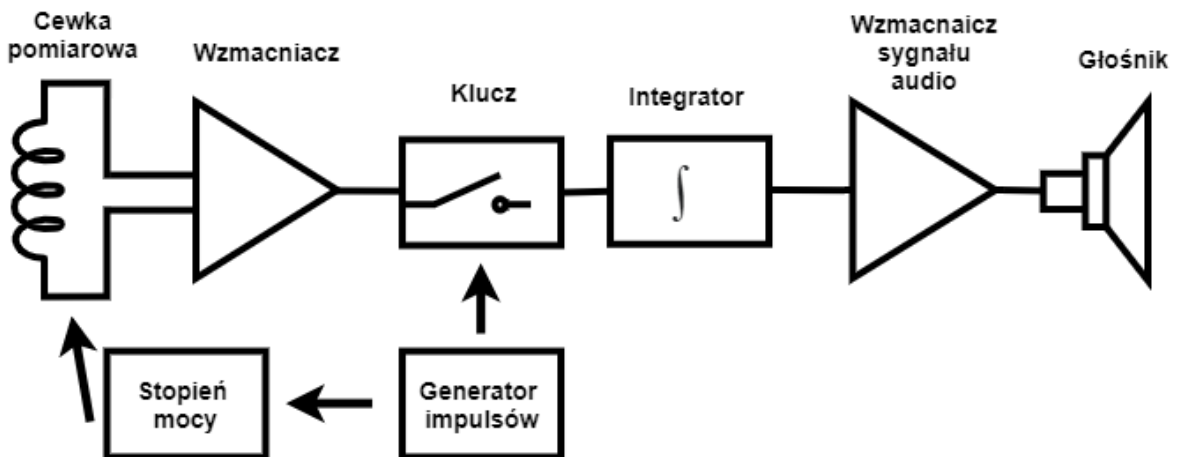


Niewątpliwą zaletą tego typu wykrywaczy jest prostota konstrukcji, jednak wymuszona wysoka częstotliwość pracy (ponad 100kHz) sprawia, że urządzenie cechuje duże tłumienie w ośrodku (glebie) oraz wrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne np. te pochodzące z linii wysokiego napięcia.

Wykrywacze tego typu nie są już obecnie produkowane ze względu na niekorzystne parametry.

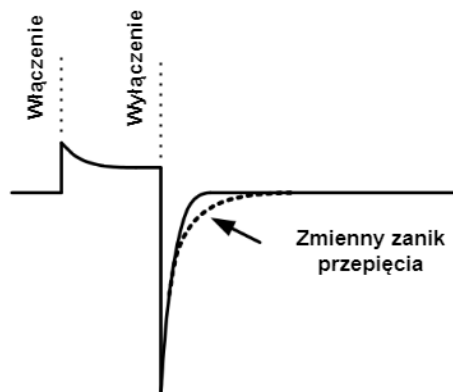
### 3.2 - PI (Pulse Induction) – wykrywacz impulsowy

Wykrywacz PI cechuje jedna cewka nadawczo odbiorcza - (TRx). [1] Na rysunku 3.2 przedstawiono schemat blokowy typowego wykrywacza PI.



Rys. 3.2 – Schemat blokowy typowego wykrywacza PI [15]

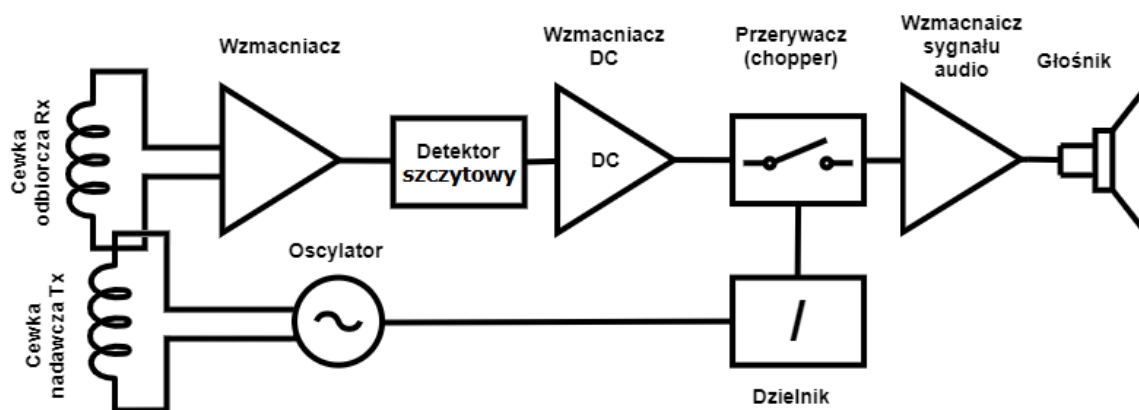
W celu detekcji metalu urządzenie generuje krótki impuls napięciowy poprzez wbudowany generator. Poprzez zwarcie klucza tranzystorowego prąd płynie przez cewkę, a kiedy klucz zostanie rozarty na cewce powstaje przepięcie indukcyjności. Czas impulsu napięciowego zależy od obecności obiektów metalowych w pobliżu sondy. Przebieg z rysunku 3.3 przedstawia skok napięcia na cewce i kolejno - brak sygnalizacji metalu – w przypadku linii ciągłej i sygnalizację metalu – w przypadku linii przerywanej.



Rys. 3.3 – Przebieg z przepięciem [1]

Pomiar różnicy czasów zaniku impulsu informuje użytkownika o wykryciu metalu. Urządzenia tego typu cechuje dobry zasięg wykrywania, prostota konstrukcji lecz brak dyskryminacji metali oraz duży pobór prądu. Wykrywacze tego typu często używane są w celu poszukiwania militariów.

**3.3 - IB (Induction Balance)** – wykrywacz o zbalansowanej indukcji/równoważeniu indukcyjnym. W takiej konfiguracji dąży się do minimalizacji napięcia niezrównoważenia między cewkami co jest nazywane balansowaniem indukcji lub równoważeniem indukcyjnym. Poniżej schemat typowego detektora IB.



Rys. 3.4 - Schemat blokowy typowego wykrywacza IB [1]

Oscylator generuje pole elektromagnetyczne poprzez cewkę nadawczą Tx. W przypadku natrafienia na obiekt metalowy pole magnetyczne jest odbierane przez cewkę odbiorczą Rx. Sygnał jest wzmacniany i prostowany przez detektor szczytowy. W dalszym ciągu sygnał jest wzmacniony przez wzmacniacz DC. Wzmacniacz audio podaje dźwięk na głośnik. Ton emitowany z niego jest proporcjonalny do poziomu sygnału DC.

Kiedy obiekt metalowy zbliży się do sondy, zakłócana jest równowaga między cewką nadawczą Tx, a cewką odbiorczą Rx. Można powiedzieć, że układ balansu indukcyjnego jest zaburzony. W trakcie tego procesu na cewce odbiorczej Rx indukuje się wyższe napięcie. Im większe napięcie trafia do przerywacza tym silniejszy będzie ton audio. Warto zauważyć, że częstotliwość dźwięku nie zmienia się jedynie ze względu na amplitudę zmian w odpowiedzi na bliskość obiektu.

Bardzo często błędnie używa się akronimów IB/VLF/GEB lub T/R jako tożsamy, zatem w tym podpunkcie pojęcia te zostaną skrótowo przedstawione aby przeciwdziałać nieścisłościom.

- **GEB (Ground Exclusion Balance)** – to grupa wykrywaczy pozwalających na wykluczenia efektu gruntu. Minerale w glebie np. żelazo czy sól zakłócają poprawne działanie wykrywacza. Posiadają one filtry, które eliminują niechciane sygnały wywołane mineralizacją gleby.
- **VLF (Very Low Frequency)** – zakres bardzo niskich częstotliwości <3kHz ÷ 30kHz>
- **T/R (Transmit/Receive)** – typ wykrywaczy odnoszący się do konfiguracji cewek w sondzie pomiarowej. T/R cechuje cewka nadawcza Tx i odbiorcza Rx

## 4. CECHY BUDOWANEGO URZĄDZENIA I SCHEMAT BLOKOWY

### 4.1 – Cechy urządzenia

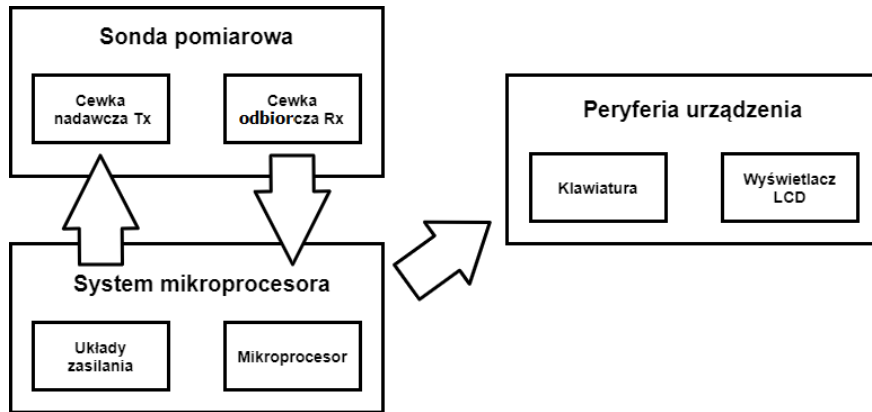
Przedmiotem niniejszej pracy jest wykrywacz IB pracujący na częstotliwościach VLF (3kHz ÷ 21kHz) zależnie od dobranej sondy, posiadający GEB i sondę w konfiguracji cewek T/R. Pracuje on na mikrokontrolerze z rodziny ARM – STM32F100C8T6. Wyposażony w wyświetlacz LCD 2x16. Posiada rozbudowane menu, system dyskryminacji metali, signograf (wizualne przedstawienie kąta fazowego) pracujący w czasie rzeczywistym oraz opcje pinpointera (wyszukiwanie punktowe). Płytkę zawiera gniazdko jack na słuchawki i transponder FM pozwalający na używanie słuchawek bezprzewodowych FM. Układy elektroniczne są zabezpieczone przed przepięciami. Zasilanie w zakresie <math>6 \div 9[V]</math> zapewniają dwie baterie litowo-jonowe 3500mAh. Autor pracy skorzystał ze schematu autorstwa rosyjskiego projektanta Andrieja Fedorova wersji rev. 2 mod 0.5 wraz z oprogramowaniem w wersji 2.6.4. Sonda urządzenia została od podstaw zaprojektowana i wykonana przez autora pracy.



Rys. 4.1 - Blok elektroniki urządzenia wraz z zasilaniem

## 4.2 – Schemat blokowy

Poniższy rozdział stanowi przedstawienie prostego schematu blokowego wraz z krótkim opisem poszczególnych bloków.



Rys. 4.2 – Schemat blokowy urządzenia

- **SONDA POMIAROWA**

- obudowa wydrukowana z wytrzymałego ABS'u, ekranowana, zabezpieczona przed wyładowaniami elektrostatycznymi warstwą grafitu, utwardzona i odseparowana od czynników zewnętrznych za pomocą chemoutwardzalnej żywicy epoksydowej, możliwa do dostrajania
- cewka nadawcza Tx generująca pierwotne pole magnetyczne o określonej przez nią częstotliwości
- cewka odbiorcza Rx odbierająca wtórne pole magnetyczne

- **SYSTEM MIKROKONTROLERA**

- mikrokontroler ARM STM32F100C8T6B odpowiadający za obróbkę odebranych sygnałów analogowych i konwersję ich na sygnały cyfrowe przez wbudowany przetwornik analogowo – cyfrowy.
- odseparowane zasilanie układów analogowych i cyfrowych, zasilania zabezpieczone przez diody i kondensatory

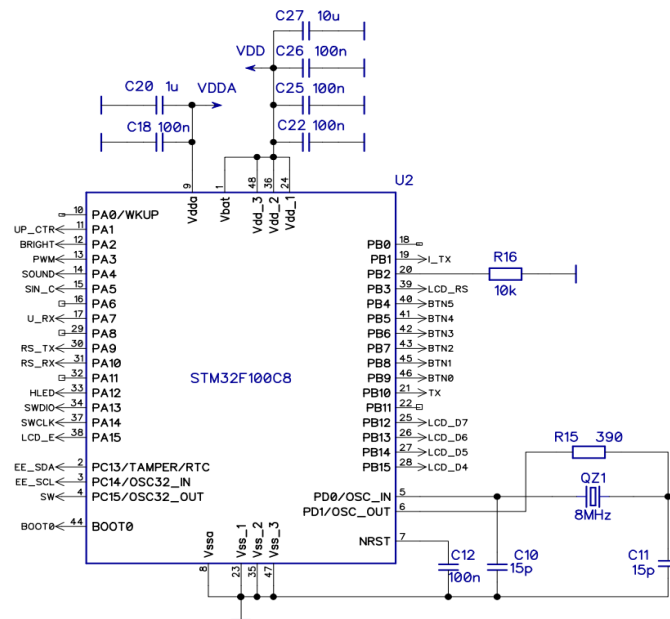
- **PERYFERIA URZĄDZENIA**

- wyświetlacz LCD 2x16 służący do prezentacji danych za pomocą signografu
- 6-przyciskowa klawiatura membranowa wbudowana w płytkę PCB pozwalająca na sterowanie

## 5. KONSTRUKCJA URZĄDZENIA

### 5.1 – Mikrokontroler wraz z połączeniami

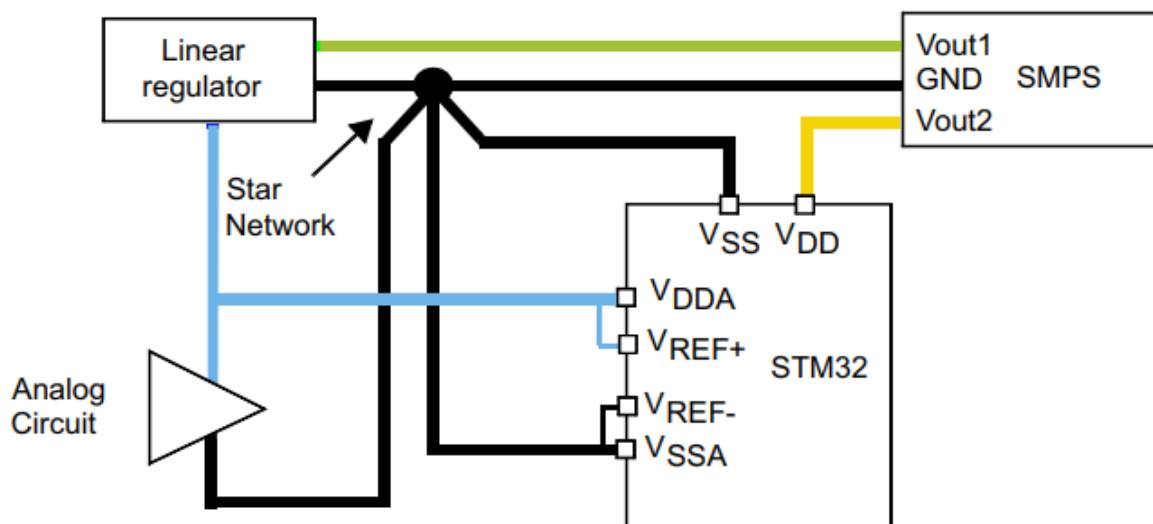
Układ oparty jest na mikrokontrolerze z rodziny STM32 – STM32F100C8T6. W celu zachowania przejrzystości układ będzie omawiany w częściach, co ułatwi zastosowanie etykiet czyli Net Labels.



Rys. 5.1 – Schemat mikroprocesora wraz z połączeniami i etykietami

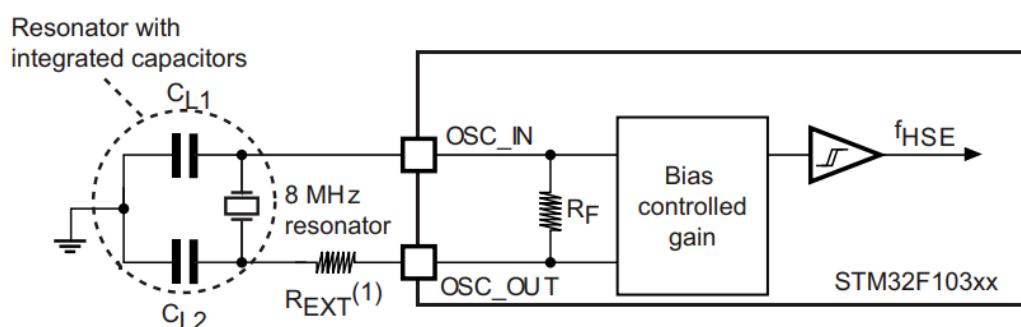
Omawiany poniżej schemat znajduje się na rys. 5.1. Pin (1) czyli VBAT to typowy dla nowoczesnych mikrokontrolerów pin pozwalający na zasilanie bateryjne. Zwarty jest on z pinami (24) – VDD\_1, (36) – VDD\_2 i (48) – VDD\_3. Piny te stanowią zasilanie cyfrowe. Sygnały poprowadzone są do masy poprzez kondensatory filtrujące zasilanie - C22 (100nF), C25 (100nF), C26 (100nF), C27 (10 µF) i do etykiety VDD – linii zasilania cyfrowego. Pin (9) – VDDA odfiltrowany jest przez kondensatory C18 (1µF) i C20 (100nF), zwarty przez nie do masy i poprowadzony do etykiety VDDA – zasilania analogowego. Pin (8) - VSSA, czyli masa analogowa, jest zwarty z masą cyfrową czyli pinami (23) – VSS\_1, (35) – VSS\_2 i (47) – VSS\_3 i poprowadzone do masy. Kondensatory filtrujące stosuje się w celu redukcji zakłóceń i tzw. szpilek napięciowych, które mogą pojawiać się w trakcie pracy układu. Zastosowano w tym miejscu kondensatory ceramiczne, które lepiej filtrują sygnały dużej częstotliwości. W przypadku mikrokontrolerów lepiej użyć kilku kondensatorów ceramicznych niż jednego elektrolitycznego. Wynika to z faktu, że kondensatory elektrolityczne posiadają relatywnie wysoką indukcyjność szeregową, która blokuje impulsy dużej częstotliwości.

Rekomendowane jest używanie dwóch rodzajów zasilania - analogowego i cyfrowego [6], co zrealizowano na schemacie z rys. 6.1. Odseparowanie zasilania pozwala na zminimalizowanie szumów i zakłóceń mających wpływ na pomiary w przetworniku ADC.



Rys. 5.2 – Ogólna idea separacji zasilania dla mikrokontrolera z rodziny STM32

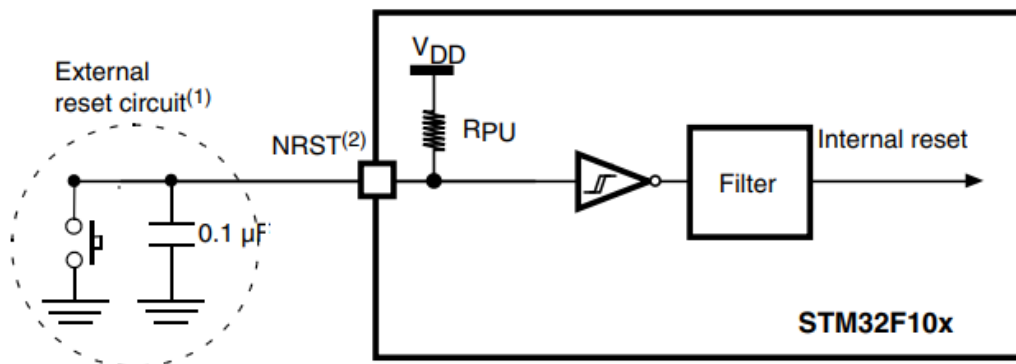
Z pinu (5) - PD0/OSC\_IN sygnał jest podawany na wejście oscylatora kwarcowego QZ1 (8MHz), zaś pin (6) PD1/OSC\_OUT pobiera sygnał oscylatora.



Rys. 5.3 – Zalecana konfiguracja podłączeń dla oscylatora

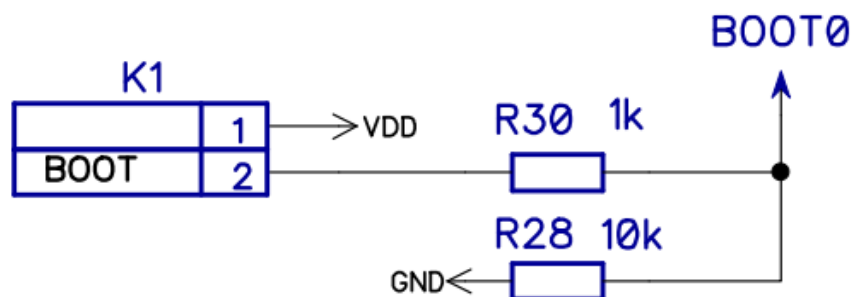
$C_{L1}$  i  $C_{L2}$  to kondensatory oznaczone na schemacie jako C10 (15pF) i C11 (15pF). Producent zaleca użycie kondensatorów w zakresie od 5pF do 25pF.  $R_{EXT}$ , oznaczony jako R15 ma rezystancję równą  $390\Omega$ . Wielkość  $R_{EXT}$  zależna jest od charakterystyki rezonatora. [7]

Pin (7) czyli NRST to reset zewnętrzny. Podłączony poprzez kondensator, który zabezpiecza pin przed zjawiskiem drgania styków.



Rys 5.4 – Zalecana konfiguracja ochronna dla pinu NRST<sup>[2]</sup>

Użyty został kondensator (0.1 µF). Pin NRST połączony jest z wbudowanym rezystorem pull-up, oznaczonym na schemacie jako  $R_{PU}$  zrealizowanym w technologii CMOS. Stan niski został ustalony w zakresie  $<-0.5 \div 0.8 \text{ [V]}>$ , zaś stan wysoki w zakresie  $<2 - V_{DD} + 0.5 \text{ [V]}>$ .  
 (2) Pin (20) – PB2 jest zwarty do masy rezystorem pull-down R16 (10k). Ten pin stanowi BOOT1. W parze z nim idzie pin (44) – BOOT 0, który jest połączony etykietą BOOT0 z poniższym 2-pinowym układem konektora szpilkowego K1. Piny te pozwalają na wgranie oprogramowania do mikrokontrolera przez programator UART. Wymogiem wgrania nowego software'u przez programator UART jest połączenie konektora K1 zworką. Proces ten jest opisany w rozdziale 9.1.



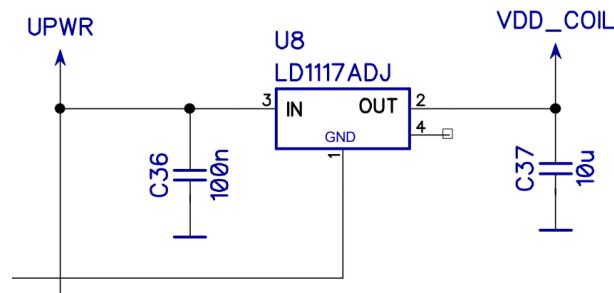
Rys. 6.5 – schemat złącza BOOT





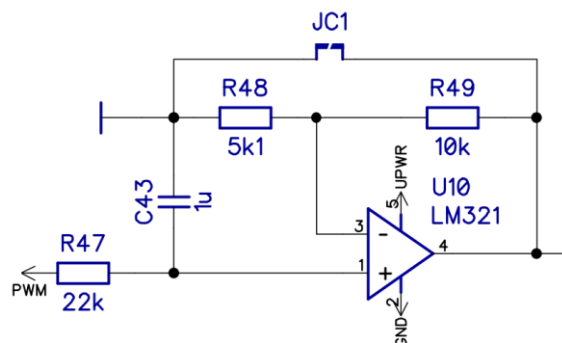
Zasilanie układów analogowych – VDDA i cyfrowych – VDD jest stabilizowane za pomocą układu LD1117. Zasilanie jest dodatkowo filtrowane przez kondensatory C17 (100nF) i C21 (10uF) dla VDD oraz C23 (100nF) i C105 (100uF) dla VDDA.

Stabilizację napięcia pracy cewek warunkuje część schematu przedstawiona na rysunku 5.8. Napięcie na cewkach jest kluczowym elementem pracy wykrywacza.



Rys. 5.8 – Stabilizacja napięcia pracy cewek

Poziom zasilania stabilizatora jest regulowany przez wzmacniacz odwracający U10 zrealizowany na prostym układzie scalonym LM321.

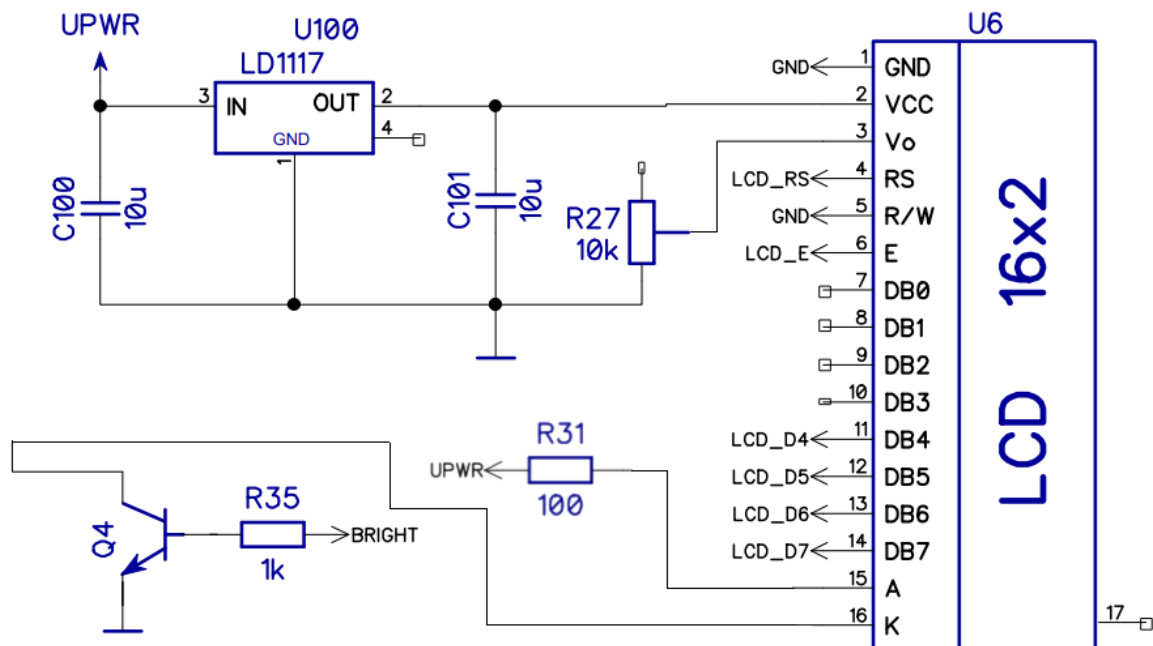


Rys. 5.9 – Układ wzmacniacza

Zasilanie wzmacniacza stanowi etykieta UPWR doprowadzona na pin (5), pin (2) podłączony jest do masy. Napięcie jest ustalone przez rezystory R48 i R49.

Układ zawiera rozwartą zworę JC1, która po zwarciu zwiera układ do masy i pozwala na pominięcie wzmacniacza.

### 5.3 - Wyświetlacz LCD 2x16



Rys. 5.10 – Układ wyświetlacza LCD 2x16

Piny (1) – GND i (5) – R/W są zwarte do masy. Z etykiety UPWR doprowadzane jest zasilanie na pin (2) – VCC, czyli zasilanie wyświetlacza LCD oraz pin (3) –  $V_0$ , który odpowiada za kontrast wyświetlacza. Napięcie wyświetlacza LCD jest stabilizowane przez układ scalony LD1117. Pin (3) -  $V_0$  można uziemić w celu uzyskania największego kontrastu. [8] W układzie zastosowano jednak potencjometr (10k) w celu manualnej konfiguracji kontrastu.

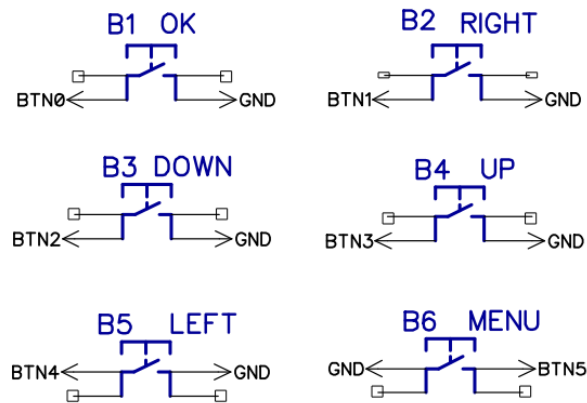
Pin (6) – E wyświetlacza LCD odpowiada za przełączanie między logicznym 1 i 0, w celu potwierdzania danych w protokole przesyłania informacji. Pin (4) – RS, odpowiada za przechodzenie między rejestrem poleceń, a rejestrem danych.

Piny (25) – PB12, (26) – PB13, (27) – PB14 i (28) - PB15 to piny danych z mikrokontrolera do ekranu LCD. Na płycie wyświetlacza LCD jest 8 pinów danych (numeracja 0-7). Umożliwia to przesył danych 8-bitowych. Wyświetlacz może również pracować w trybie 4-bitowym i w takim przypadku pozostałe data piny zostają wolne. Urządzenie pracuje właśnie w tym trybie – 4-bitowym. Zatem cztery piny (25) – PB12, (26) – PB13, (27) – PB14 i (28) - PB15 mikrokontrolera połączone są z czterema pinami (11) – DB4, (12) – DB5, (13) – DB6 i (14) – DB7.

Pin (15) – A, połączony jest z etykietą UPWR poprzez rezystor R31 (100Ω). Pin ten stanowi anodę, zaś pin (16) – K jest katodą dla diody LED w wyświetlaczu LCD.

## 5.4 - Układ przycisków/sterowania

Piny (40) – PB4, (41) – PB5, (42) – PB6, (43) – PB7, (45) – PB8 i (46) – PB9 odpowiadają za sterowanie urządzeniem poprzez przyciski – przedłużone mikro przełączniki zwarte do masy. Schemat prezentuje rysunek 6.11.

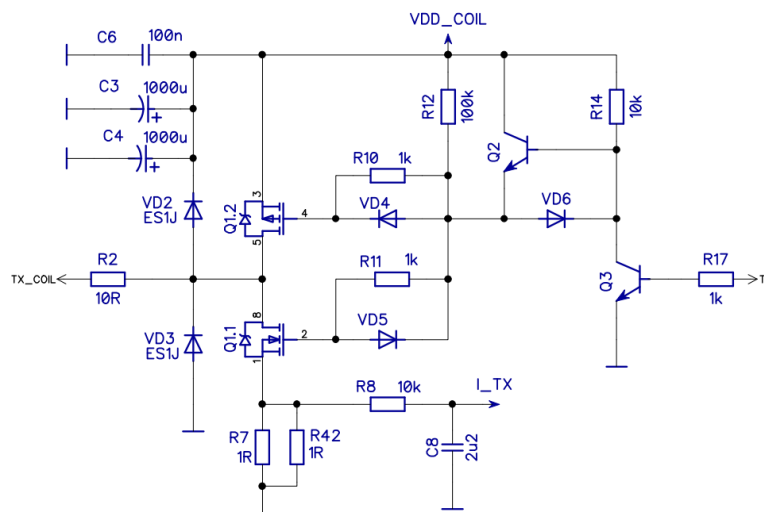


Rys. 5.11 – Układ przycisków

W układzie występuje jeszcze jeden przycisk B100 – POWER, który zawarty jest rozdziale 6.9 – Układy zasilania i zabezpieczeń.

## 5.5 - Układ nadajnika dla cewki nadawczej Tx

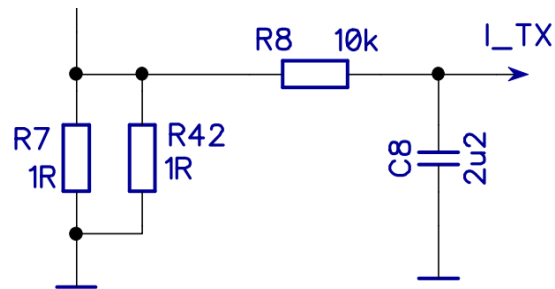
Pin (19) – PB1 połączony jest z etykietą I\_TX. Razem z pinem (21) - PB10 oznaczonym etykietą TX wchodzi na poniższy układ.



Rys. 5.12 – Część schematu stanowiąca układ nadajnika

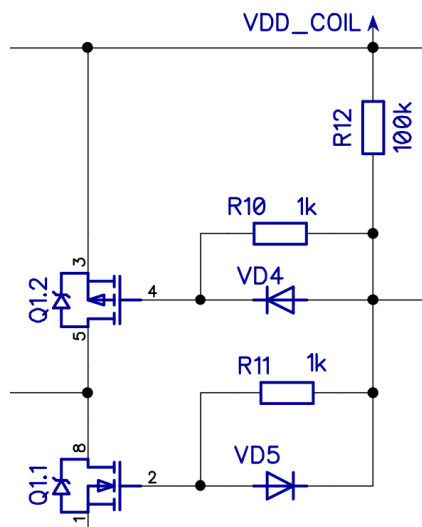
Z mikrokontrolera STM32F100C8 poprzez etykietę TX, sygnał jest podawany na wejście wzmacniacz prądowego zrealizowanego na tranzystorach bipolarnych Q2 i Q3. Zastosowanie tranzystorów bipolarnych we wzmacniaczu prądowym układu, wynika z faktu, że sterowane są one prądowo. Układ jest zabezpieczony przed przepięciami diodą VD6.

Rezystory R7 ( $1\Omega$ ) i R42 ( $1\Omega$ ) są połączone równolegle. To rozwiązanie pozwala na dostosowanie wzmocnienia stopnia wejściowego układu wykrywacza, poprzez odpowiedni wybór rezystora R7. Domyślnie jest on ustalony na  $1\Omega$ .



Rys. 5.13 – Kluczowe rezystory – R7 i R42

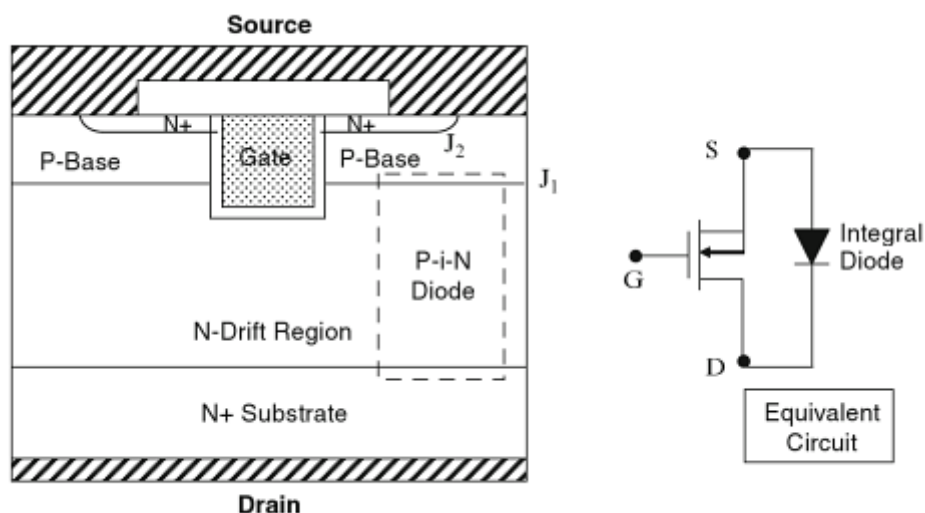
Układ z rysunku 6.13 realizuje również funkcję pomiaru prądu obciążenia, czyli prądu jaki przechodzi przez cewkę nadawczą Tx i doprowadza ten sygnał do etykiety I\_TX. Etykieta ta wchodzi na pin (19) – PB1 mikrokontrolera. Tam sygnał jest poddawany przetworzeniu na sygnał cyfrowy w przetworniku AC.



Rys. 5.14 – Wzmacniacz napięciowy na tranzystorach MOSFET

Kolejna część to wzmacniacz napięciowy zrealizowany na tranzystorach MOSFET, Q1.1 – typu NMOS i Q1.2 – typu PMOS, również zabezpieczony przed przepięciami przy pomocy diod VD4 i VD5. Oba tranzystory mają kanał wzbogacany. Wykorzystanie tranzystorów MOSFET wynika z faktu, że sterowane są one napięciowo i mają izolowaną bramkę.

Tranzystory na schemacie mają diodę Zenera między bramką, a źródłem. Element ten jest jednak wbudowany w tranzystory i wynika ze specyfiki tego elementu. Nie jest on realizowany oddzielnie na płycie PCB.



Rys. 5.15 – Struktura tranzystora MOSFET z wbudowaną diodą

Kondensatory elektrolityczne C3 (1000  $\mu$ F), C4 (1000  $\mu$ F) oraz kondensator ceramiczny - C6 (100nF) stanowią w układzie wzmacniacza filtrację napięcia.

Diody VD2 i VD3 zabezpieczają przed zjawiskiem indukcji własnej cewki. Model matematyczny samoindukcyjności lub indukcji własnej, prezentuje się następująco.

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$\varepsilon$  - indukowana siła elektromotoryczna, w woltach

L - Indukcyjność cewki lub elementu obwodu elektrycznego, w henrach,

$\Delta I$  - zmiana natężenia prądu, w amperach

$\Delta T$  – zmiana czasu, w sekundach



Poszczególne piny kolejną oznaczają:

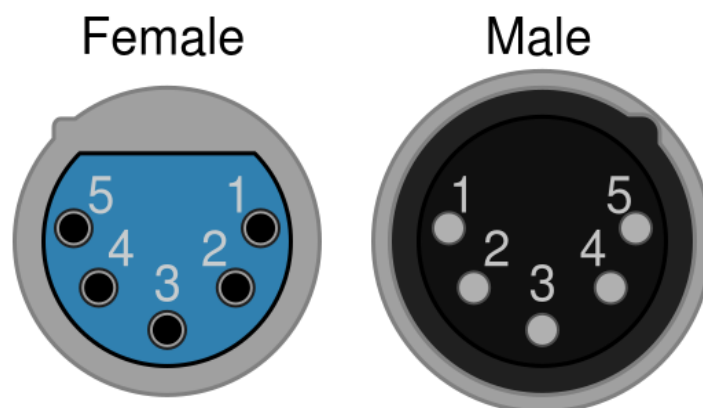
- (1) – U+ części odbiorczej
- (2) – U- części odbiorczej
- (3) – ekran kabla
- (4) – U+ części nadawczej
- (5) – U- części nadawczej

Piny (2) – RX-, (3) – TX- oraz (4) – ekran, zwarte są do masy. Pin (5) – TX+ opatrzony jest etykietą TX\_COIL. Układ nadawczy jest opisany we wcześniejszej części pracy.

Część schematu ze wzmacniaczem U1.1. wzmacnia sygnał odbierany przez odbiorczą część cewki – Rx.

Wzmocniony sygnał wchodzi na etykietę U\_RX i jest doprowadzany do pinu (17) – PA7 mikrokontrolera. Pin ten to jedno z wejść przetwornika AC, sygnał który tam trafia poddawany jest obróbce cyfrowej.

W układzie znajdują się etykieta SIN\_C. Sygnał idzie na nią z pinu (15) – PA5 mikrokontrolera. Sygnał ten stanowi kompensację balansu czujnika. Jest on zmieszany z sygnałem wejściowym w celu uzyskania odpowiedniej amplitudy i fazy. Sygnał ten jest obecny przy włączonym kompensatorze. Zatem w takiej sytuacji obwód stanowi sumator niezbalansowanego sygnału sinusoidalnego i sygnału kompensacji generowanego przez PWM z mikrokontrolera.

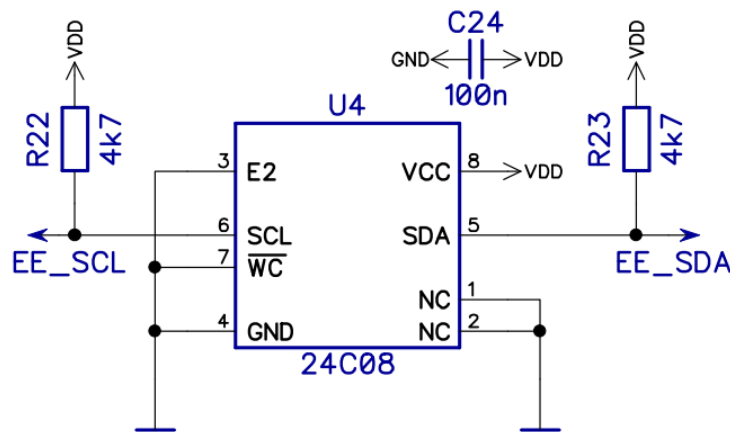


Rys. 5.17 – Schemat użytego konektora DMX. [18]



## 5.7 - Układ pamięci EEPROM dla wykrywacza

Kolejną częścią omawianego układu jest 8-kilobajtowa pamięć EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) w obudowie SOIC-8, komunikująca się z mikrokontrolerem poprzez magistralę I2C, zrealizowana na układzie 24C08B. [19]



Rys. 5.18 – Część schematu z pamięcią EEPROM

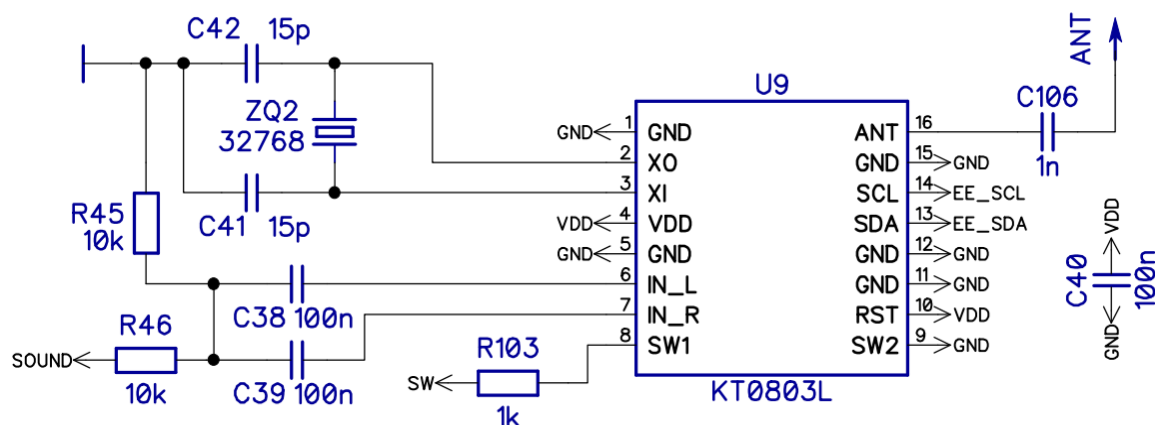
Piny układu 24C08, kolejno (1) - NC, (2) - NC, (3) – E2, (4) - GND, (7) - WC są zwarte do masy. Pin zasilania (8) – VCC jest podłączony do etykiety VDD, czyli zasilania cyfrowego. Pin (5) – SDA, podciągnięty jest do zasilania VDD poprzez rezystor pull-up R23 (4k7) i wchodzi na etykietę EE\_SDA, która łączy układ 24C08 z mikrokontrolerem na pinie (2) – PC13/TAMPER/RTC. Mikrokontroler generuje poprzez RTC (Real Time Clock) impuls zegarowy kluczowy dla działania komunikacji I<sup>2</sup>C. Pin (6) – SCL, analogicznie podciągnięty jest do zasilania cyfrowego poprzez rezystor pull-up R22 (4k7) i wchodzi na etykietę EE\_SCL, która wchodzi na pin (3) – PC14/OSC32\_IN mikrokontrolera.

Zgodnie z notą katalogową układu 24C08 pin, układ jest sterowany przez urządzenie nadrzędne (Master), które generuje sygnał zegarowy i podaje go na pin (6) – SCL. Pin ten jest podciągnięty do etykiety VDD przez rezystor pull-up R22 (4k7).

Mikokontroler pracuje w tym układzie jako Master, zaś 24C08 jako Slave. Poniżej zaprezentowano przykładowy schemat działania takiego układu poprzez magistralę I2C.

## 5.8 - Układ nadajnika FM

Kolejny omawiany układ stanowi KT0803L. Jest to układ nadajnika FM.



Rys. 5.19 – Część schematu z nadajnikiem FM

KT0803L również pracuje w konfiguracji Slave względem mikrokontrolera, który stanowi Master. Komunikacja zachodzi poprzez magistralę I<sup>2</sup>C, o czym świadczą piny (14) – SCL, podpięty do etykiety EE\_SCL wychodzącej z mikrokontrolera i taktującej zegar oraz (13) – SDA (I/O), podpięty do etykiety EE\_SDA. Oba te piny posiadają wbudowany rezystor pull-up (47k). Aby komunikacja I<sup>2</sup>C mogła zachodzić z odpowiednią precyzją, użyty został rezonator kwarcowy o odpowiednich parametrach – ZQ2.

Piny (2) – XO i (3) – XI zostały podłączone do rezonatora kwarcowego ZQ2. Rezonator ten pracuje z częstotliwością 32.768 kHz na sekundę. W dalszym ciągu przez kondensatory C41 i C42 sygnał poprowadzony jest do masy.

Istotnymi pinami są pin (8) – SW1, oraz pin (9) – SW2. Zależnie od źródła sygnału zegarowego muszą na nich panować odpowiednie stany logiczne. Konfiguracja bitów jest przedstawiona na poniższej tabeli z rys. 6.20.

**Table 5: Pin SW1/SW2**

SW1	SW2	Chip Mode	IOVDD	Clock Source
0	0	Power Off	1.6~3.6V	N/A
0	1	Power On	1.6~3.6V	12MHz
1	0	Power On	1.6~3.6V	32.768KHz
1	1	Power On	1.6~3.6V	7.6MHz

Rys. 5.20 – Konfiguracja pinów dla oscylatora w KTO803L [4]

Źródłem sygnału zegarowego jest generator kwarcowy o taktowaniu 32.768kHz/s, wobec tego pin (8) - SW1 stanowi stan wysoki, a pin (9) – SW2 stan niski.

Poprzez rezystor R103 (1k) pull-up na SW1 podciągany jest stan wysoki z mikrokontrolera, zaś zwarte do masy SW2 gwarantuje stan niski. W ten sposób następuje selekcja zegara.

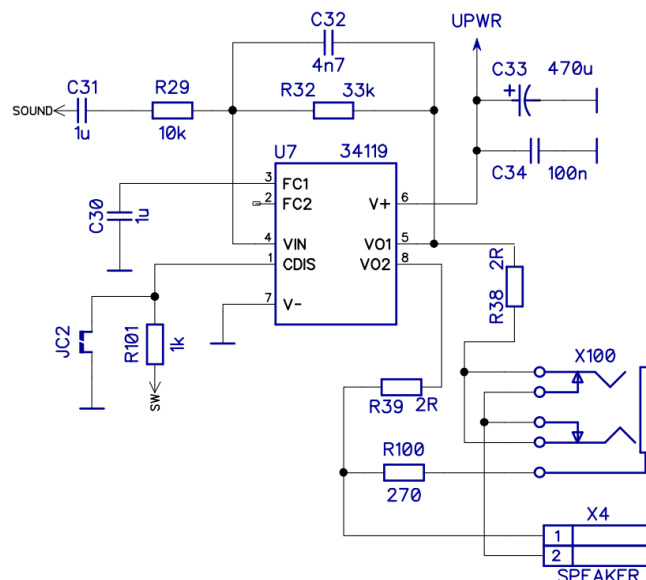
Piny (1) - GND, (5) - GND, (9) – SW2, (11) - GND, (12) - GND i (15) - GND zostały podłączone do masy.

Pin (10) – RST, stanowi funkcję resetu i aktywny jest przy stanie niskim. Jest on podłączony do zasilania VDD co warunkuje stan wysoki i brak resetu.

Pin (16) – ANT wyprowadza analogowy sygnał FM poprzez kondensator C106 do etykiety ANT. Zakończenie tego sygnału znajduje się w padzie lutowniczym, stanowiącym antenę układu FM.

## 5.9 – Tor audio wykrywacza

Pin (6) – IN\_L i (7) – IN\_R to wejścia analogowego sygnału audio, kolejno – lewy i prawy jego kanał. Lewy kanał audio ściągnięty jest do masy przez rezystor pull-down R45 (10k). Poprzez kondensatory C38 (100n) i C39 (100n) sygnał idzie na rezystor R46 (10k) i trafia do tzw. toru audio układu opatrzonego etykietą SOUND.



5.21 – Część schematu realizującej tor audio dla wzmacniacza

Tor Audio oparty jest o prosty wzmacniacz audio małej mocy – 34119 w 8-pinowej obudowie SOICN.

Kluczowym elementem tego układu jest kondensator C31 (1 $\mu$ F) na wejściu, połączony w szeregu z rezystorem R29 (10k). Elementy te stanowią filtr na wejściu wzmacniacza pozwalający na tłumienie składowej stałej i korzystnego PSRR (Power Supply Rejection Ratio).

$$PSSR[dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{\Delta V_S^2 A_V^2}{\Delta V_0^2} \right) dB$$

$V_S$  – napięcie zasilania

$A_V$  – wzmocnienie napięciowe

$V_0$  - napięcie wyjściowe

Pin (2) – FC2 nie jest podłączony. Taką konfigurację można zastosować, gdy kondensator na FC1 jest wystarczający do uzyskania satysfakcjonujących parametrów. [12] Pin (3) – FC1 to masa analogowa wzmacniacza, a poprzez zastosowanie kondensatora C30 (1 $\mu$ F) uzyskuje się odpowiedni współczynnik PSRR wynoszący (typowo) 52dB. [5]

Pin (7) –  $V^-$  to masa całego układu.

Pin (1) – CDIS (Chip Disable), pozwala na załączanie układu logiczną jedynką (>2.0V) lub jego wyłączanie logicznym zerem (<0.8V). Impedancja wejściowa powinna wynieść ok. 90 $\Omega$ . CDIS połączone jest z pinem (4) – SW mikrokontrolera poprzez rezystor R101 (1k) i z masą przez rozwartą domyślnie zworę JC2.

Pin (6) –  $V^+$ , doprowadza napięcie zasilające z sieci oznaczonej etykietą UPWR. Napięcie to jest filtrowane przez dwa kondensatory – elektrolityczny C33 (470 $\mu$ F) i ceramiczny C34 (100nF), zwarte do masy. Zasilanie dla tego układu powinno wynieść od +2.0V do +16.0V.

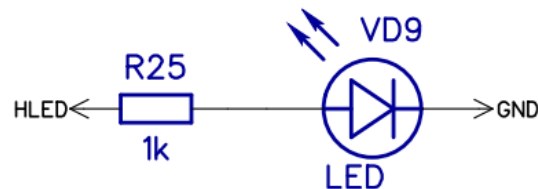
Układ posiada dwa wyjścia – pin (5) – V01 i pin (8) – V02. Wyjścia te posiadają te same wartości prądu DC i takie same amplitudy, jednak V02 jest przesunięte w fazie względem V01 o 180°. Dla pinów (5) i (8) wartość prądu DC wynosi:

$$\frac{V_{CC} - 0.7V}{2}$$

Sygnal z pinu (5) – V01, prowadzony jest przez rezystor R38 (2R) do gniazda jack, stanowiącego gniazdo słuchawkowe wykrywacza. Pin (8) – V02 przez rezystor R39 (2R) jest połączone z konektorem głośnika, a przez R39 (2  $\Omega$ ) i R100 (100  $\Omega$ ) połączone równolegle z gniazdem jack.

## 5.10 – Dioda diagnostyczna

Układ wyposażony jest również w diodę diagnostyczną VD9 podłączoną przez rezystor R25 (1k) do etykiety HLED, czyli pinu (33) – PA12 mikrokontrolera.



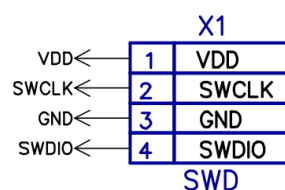
Rys. 6.22 – Część schematu z diodą diagnostyczną

Dioda diagnostyczna zaprogramowana jest na kilka konfiguracji, które świadczą o poszczególnych błędach:

- Pojedyncze mrugnięcie – układ działa bez błędów
- Dioda migająca powoli bez przerwy – błąd podczas przechodzenia testów portów procesora, na ekranie powinien wyświetlić się błąd, jeśli na ekranie nie ma obrazu należy sprawdzić jego połączenie
- Dioda migająca szybko bez przerwy – oscylator kwarcowy nie uruchamia się

## 5.11 – Interfejs programatora – debuggera

Interfejs programatora-debuggera stanowi dwuliniowy SWD (Serial Wire Debug). Zatem komunikacja z urządzeniem następuje za pomocą prostego programatora. Aby jednak móc się połączyć poprzez programator z płytką należy wyprowadzić piny do komunikacji.



Rys. 5.23 – Część schematu z konektorem dla interdejsu SWD

## 6. SONDA POMIAROWA

### 6.1 – Procedura wykonania sondy pomiarowej

Autor pracy zdecydował się na zbudowanie sondy w konfiguracji DD (Double-D). Sondy te są stosunkowo proste do wykonania i uzyskuje się w nich bez większego trudu pożądane parametry. Budowa sondy pomiarowej dla wykrywacza jest działaniem wielopłaszczyznowym i stanowi pewien proces technologiczny. Zostanie on opisany w niniejszej pracy.

Z wytrzymałego na wstrząsy i uszkodzenia mechaniczne ABS'u, wydrukowano za pomocą drukarki 3D obudowę w odpowiednim kształcie o pożądanych rozmiarach. ABS to terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy. Cechuje go duża twardość i odporność na zarysowania. [22] Obudowa ma rozmiary 27 cm wysokości, 25 cm szerokości. Jeśli chodzi o typ obudowy to jest to tzw. „sniper coil”. Sondy te posiadają węższy zakres emitowanego pola magnetycznego, jednakże ich pole jest głębsze [21]. Przed jakimikolwiek działaniami obudowę należy wyczyścić i odtłuścić. W tym celu użyto izopropanolu. Zależnie od materiału z jakiego wykonana jest obudowa należy odpowiednio dobrać substancję czyszczącą. Przykładowo aceton stanowi rozpuszczalnik dla ABS' u.



Rys. 6.1 – Góra i dół obudowy sondy po wydrukowaniu, przed usunięciem podpór

Kolejną czynnością jest usunięcie podpór z obudowy. Autor pracy skorzystał z noża introligatorskiego i kombinerek.



Rys. 6.2 – Obudowa po usunięciu podpór

Następny krok stanowi wtopienie miedzianego drutu o średnicy 0.3 mm w celu uzyskania równomiernej rezystancji w późniejszym ekranie grafitowym. W tym celu użyto przewodu z kabla UTP i pozbawiono go izolacji. Został on wtopiony lutownicą we wnętrze cewki. Ważnym aspektem jest ułożenie drutu. Należy unikać zamkniętych pętli, gdyż może to indukować pole magnetyczne. Drut połączony będzie z kablem ekranu oraz z masą bloku elektroniki wykrywacza.

Aby odizolować cewkę od przepięć i wyładowań zewnętrznych należy stworzyć ekran. Autor pracy zdecydował się na stworzenie ekranu grafitowego. Ekran grafitowy również nie może tworzyć zamkniętych pętli. Warstwa grafitu musi mieć odpowiednią rezystancję zawierającą się w zakresie  $\pm <400 \div 2000>$  ohm. Wartość tą można zmierzyć multimetrem, przy pomocy funkcji pomiaru rezystancji. W celu stworzenia lakieru grafitowego, autor pracy skorzystał z denaturatu, lakieru i grafitu w proszku w odpowiednich proporcjach, kolejno 2-3-3.





Rys. 6.3 – Składniki i wykonany lakier grafitowy

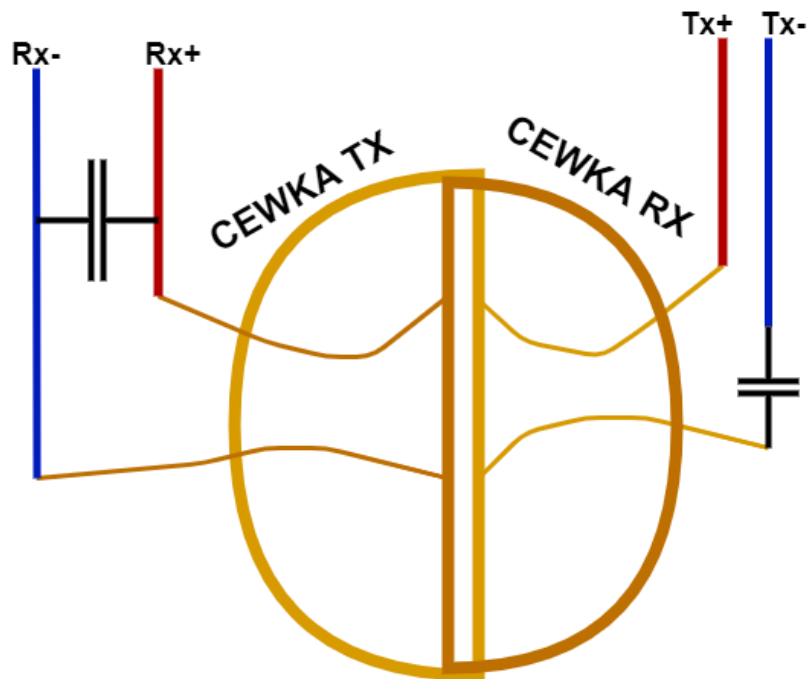
Kolejnym etapem jest nawinięcie cewki. Można to zrobić za pomocą wykonanego wcześniej kopyta do nawijania cewek. Jest ono skonstruowane z drewnianej deski bądź sklejki jako podłoża i gwoździ lub kołków wbitych w jej powierzchnię.



Rys. 6.5 – Obudowa sondy pokryta lakierem grafitowym, obok sporządzone na jej podstawie kopyto do nawijania cewek



Kolejny etap stanowi nawinięcie cewek. Do nawinięcia cewek użyto drutu nawojowego o średnicy 0.45mm i 0.20mm. Ilość zwojów dookoła dobiera się empirycznie. Literatura sugeruje, że standardową konfiguracją jest ok. 50 zwojów dla cewki nadawczej Tx i 200 obrotów dla cewki odbiorczej Rx. [1] Jednakowoż nie jest to bardzo istotne, bowiem częstotliwości rezonansowe stanowiące kluczową cechę cewek, dobiera się kondensatorami w połączeniu szeregowym dla Tx i równoległym dla Rx. Prezentuje to rysunek 8.5.



Rys. 6.4 – Konfiguracja cewek i kondensatorów

Autor pracy zdecydował się na nawinięcie cewek w konfiguracji:

- 45 zwojów drutem nawojowym o średnicy 0.45mm
- 200 zwojów drutem nawojowym o średnicy 0.20mm

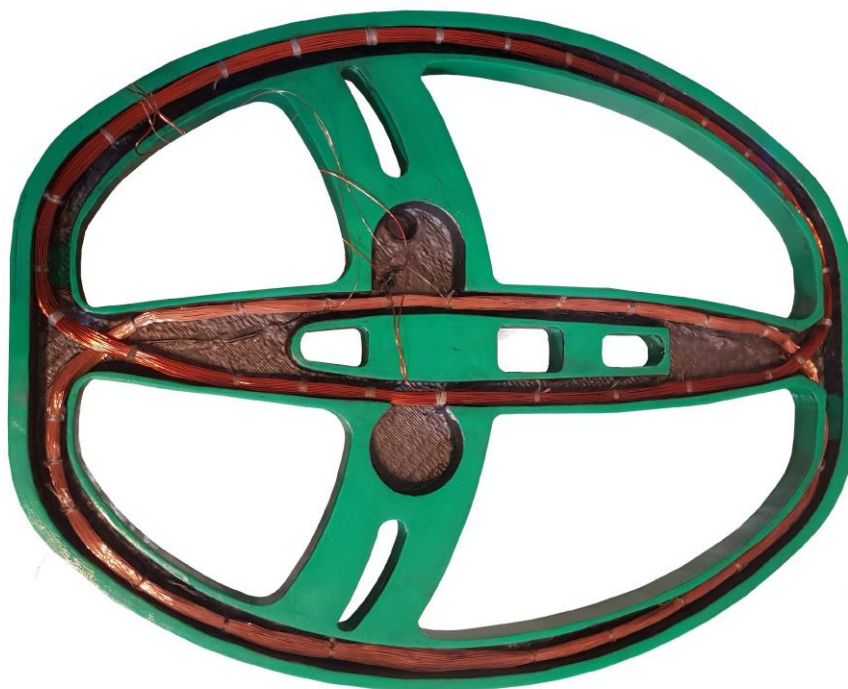
Empirycznie dobrane zostały kondensatory - 220 nF dla Tx i 22nF dla Rx.

Elementy te wraz z powyższym uzwojeniem uwarunkowały częstotliwość na poziomie ok. 7.5kHz dla Tx i 6.0kHz dla Rx. Prąd Tx wyniósł ok. 120mA, zaś prąd Rx 14mA. Opór uzwojenia Tx – 5.8 ohm, z kolei uzwojenie Rx – 64.2 ohm.

Parametry te zostały zmierzone przez blok elektroniki wykrywacza, który posiada taką funkcję. Opór zmierzono miernikiem.

Uzwojenia zostały dodatkowo usztywnione gęsto nawiniętą nicią.

Kolejnym etapem było osadzenie cewek w obudowie. Cewki zachowały plastyczność, więc nie stanowiło problemu dogiąć je w odpowiednich miejscach.



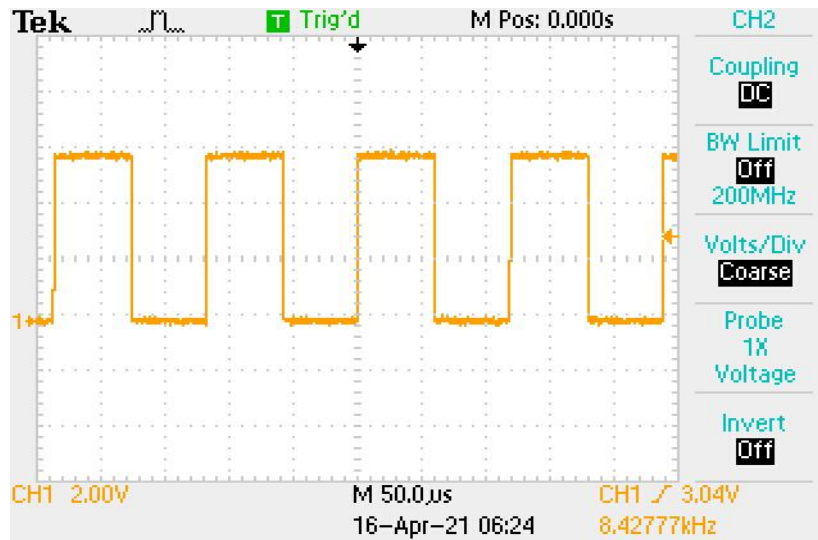
Rys. 6.6 – Cewki po osadzeniu w obudowie

Jak wspomniano w rozdziale 3.3 cewki w wykrywaczu metali IB muszą pracować w układzie balansu. Zależnością która określa ten balans jest napięcie niezrównoważenia wyrażane w mV. Powszechnie uważa się, że im ten parametr jest niższy tym lepiej pracuje sonda. Niektóre źródła podają, że każdy wykrywacz ma zakres napięcia w którym pracuje najlepiej [1]. Odpowiednie napięcie niezrównoważenia osiąga się empirycznie przesuwając cewki względem siebie i obserwując balans na przyrządzie pomiarowym. W tym przypadku funkcję taką posiada software wykrywacza.

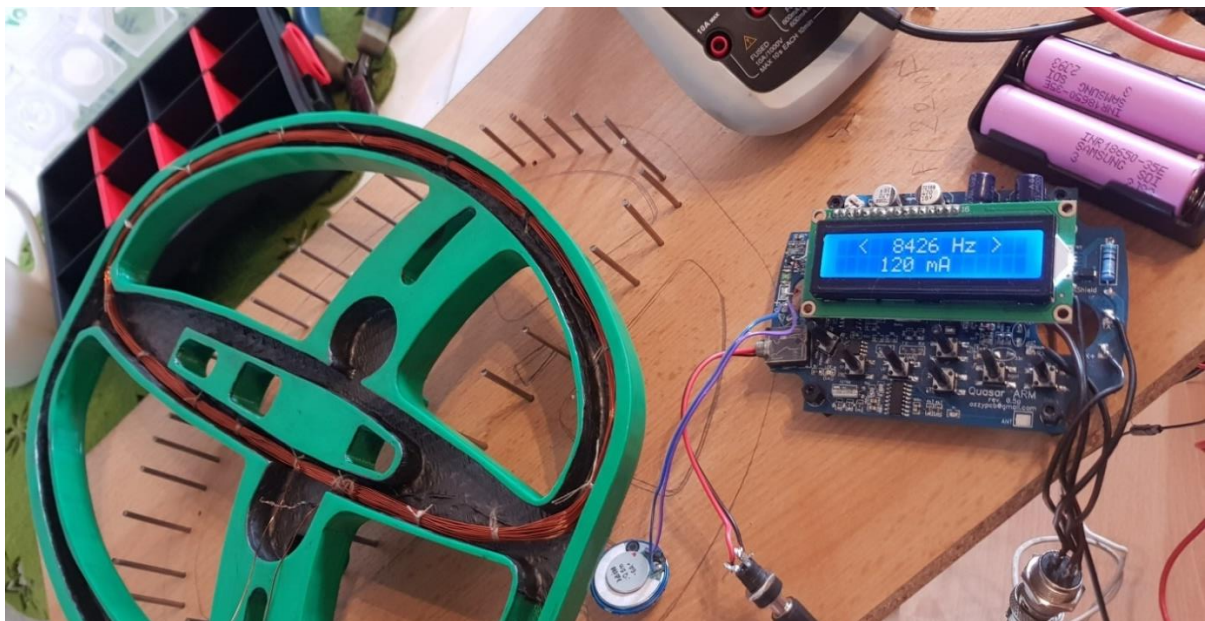
Prąd i częstotliwość na cewce nadawczej Tx można korygować poprzez software wykrywacza w pewnym stopniu, jednakże zmiana któregoś z tych parametrów, zawsze zachodzi kosztem drugiego.

Wykrywacz posiada funkcję PWM opisaną w rozdziale 8.3. Pozwala ona na ustalenie prądu cewki nadawczej poprzez regulację PWM. Po podłączeniu do oscyloskopu na pinach Tx<sup>+</sup> i Tx<sup>-</sup> na konektorze DMX można zaobserwować sygnał prostokątny, którym można manipulować przy pomocy funkcji PWM.

Napięcie niezrównoważenia udało się uzyskać na poziomie ok.200mV.



Rys. 6.7 – Sygnał na TX



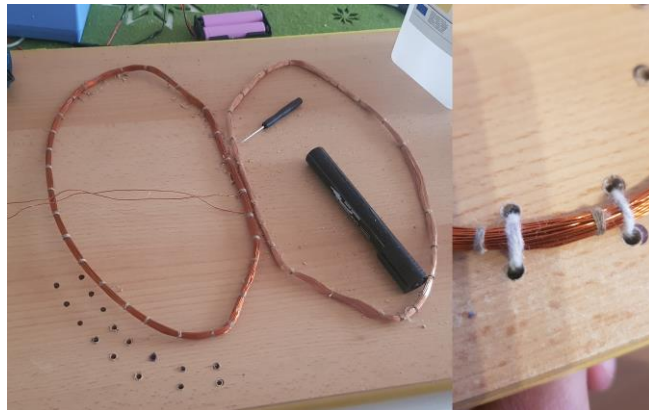
Rys. 6.8 – Pomiar częstotliwości i prądu na cewce Tx

Na tym etapie autor zrezygnował z zalewania sondy żywicą epoksydową, gdyż okazało się, że cewki są zbyt wrażliwe na jakiegokolwiek ruchy. Zalanie żywicą mogłoby trwale rozbalansować cewki i uniemożliwić jakiegokolwiek testy urządzenia, wobec tego czynności z rozdziału 8 zostały wykonane na „otwartej” sondzie.

## 6.2 - Dodatkowa konfiguracja cewek – sonda statyczna

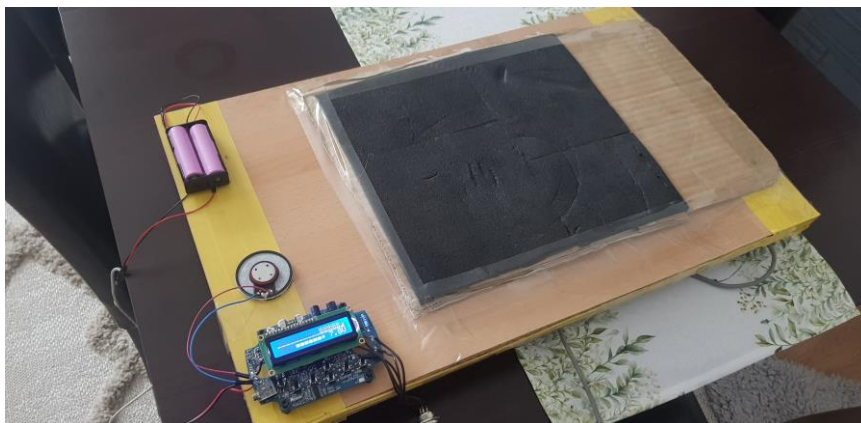
W rozdziale 6.1 możliwość poruszania cewkami względem siebie (w celu uzyskania odpowiedniego napięcia niezrównoważenia) została mocno ograniczona przez ciasną obudowę. Autor pracy w celu poprawienia parametrów zbudował sondę statyczną. Skorzystano z dwóch cewek z poprzedniego podrozdziału.

Do płaskiej platformy ze sklejkki przymocowano (za pomocy biernych elektrycznie elementów) cewki. Brak ograniczeń fizycznych w postaci obudowy pozwolił na uzyskanie korzystnego napięcia niezrównoważenia – 20mV, zaś szerszy rozstaw cewek sprawił, że emitowane pole magnetyczne miało większą objętość. [1] Pozostałe parametry takie jak częstotliwości pracy cewek nie zmieniły się. Proces wiercenia i mocowanie przedstawia rysunek 6.9.



Rys. 6.9 – Wiercenie otworów na platformie i mocowanie cewek przy pomocy sznurka.

Efektem końcowym jest gotowa platforma przykryta warstwą kartonu i pianki polimerowej.



Rys. 6.10 – Gotowa platforma z cewkami

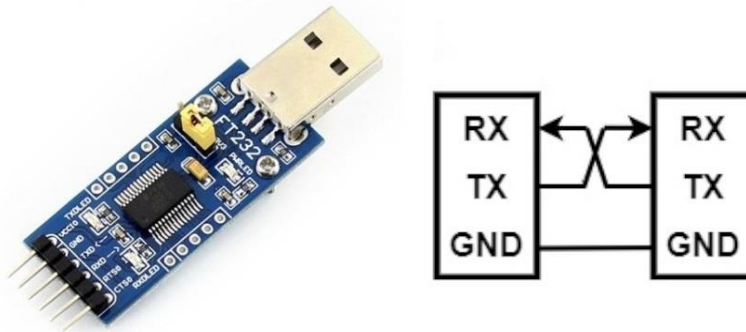
## 7 - SOFTWARE i OPIS DZIAŁANIA

### 7.1 – Wgrywanie software'u

Obecna wersja software'u to 2.6.4. Plik w formacie .hex należy wgrać przez jeden z wybranych interfejsów UART lub SWD.

#### - UART

W przypadku wgrywania software'u przez interfejs UART należy nawiązać komunikację między komputerem, a urządzeniem za pomocą programatora TTL. Schemat połączeń jest następujący: RX-TX, TX-RX, GND-GND. Następnie zaś program wgrywa się przez program Flash Loader Demo.



Rys. 8.1 – Programator UART i schemat połączeń

#### - SWD

Wgrywanie software'u za pomocą interfejsu SWD wymaga programatora w postaci urządzenia ST-Link. Schemat połączeń to: SWDIO-SWDIO, SCLK-SCLK, GND-GND. Aby wgrać program konieczne jest środowisko STM32 ST-LINK Utility.



Rys. 7.2 – Programator STLINK V2 (SWD) i schemat połączeń



## 7.2 – Ekran główny

Po uruchomieniu urządzenia na wyświetlaczu pojawia się ekran główny. W górnym rzędzie ekranu głównego znajduje się 16 segmentowa skala VDI. W dolnym rzędzie jest pokazany poziom napięcia na akumulatorze i kąt fazowy wynikający z sygnału z cewki (przełączają się one naprzemiennie). Po lewej stronie dolnego rzędu pojawia się prąd płynący przez cewkę nadawczą Tx w mA.

Symbol „\*”, na głównym ekranie oznacza, że dioda podświetlająca LCD jest włączona.



Rys. 7.3 – Ekran główny urządzenia

Symbol „\*”, na głównym ekranie oznacza, że dioda podświetlająca LCD jest włączona. Zaleca się, aby podświetlenie podczas użytkowania wykrywacza w ciągu dnia było wyłączone. Znacząco zwiększa ono pobór mocy.

Urządzenie posiada szereg różnych opcji i ustawień. Aby móc je modyfikować i przeglądać po uruchomieniu urządzenia poprzez przycisk POWER, należy wcisnąć przycisk MENU.

### 7.3 – Opis funkcji software'u

Poniższy rozdział stanowi opis wszystkich funkcji dla menu wykrywacza, z wyszczególnieniem na submenu, funkcję i zakres.

**AUDIO** – wszelkie parametry dźwiękowe urządzenia, opcja ta posiada kilka podopcji

- Frequency max – ustawianie maksymalnej częstotliwości dźwięku, zakres <1000 ÷ 3000 Hz>
- Volume – poziom głośności, zakres <0 ÷ 31>/OFF
- Volume var – wariant dźwiękowy <1 ÷ 7>
- Threshold – ustawienia dźwięku, gdy pod sondą nie znajduje się żaden obiekt, gleba jest „czysta” <1 ÷ 31>/OFF
- Duration – czas trwania sygnału <Short/Long>
- Sound scheme – schemat dźwiękowy, konfiguracja dźwięków podczas detekcji zakres <1 ÷ 3>

- schemat 1 – częstotliwość dźwięku płynnie zmienia się zależnie od wskazania VDI na ekranie, obiekt znajduje się w całym zakresie

- schemat 2 – częstotliwość dźwięku płynnie zmienia się w zakresie  $90^\circ < \phi < 131^\circ$ , obiekty  $\phi < 90^\circ$  są sygnalizowane tonem niskim, zaś  $\phi > 131^\circ$  tonem wysokim

- schemat 3 – obiekty  $\phi < 90^\circ$  są sygnalizowane niskim tonem, zaś  $\phi > 90^\circ$  tonem wysokim

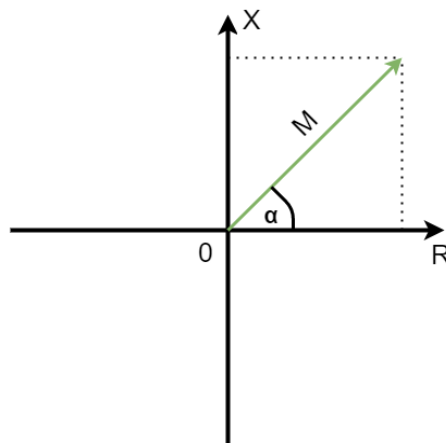
- LF boost – kontrola tłumienia/wzmocnienia głośności w zakresie niskich częstotliwości (low frequencies), zakres <-6, -3, 0, 3, 6> [dB/oktawa], wartości na minusie to tłumienie, na plusie – wzmacnianie, 0 – wartość neutralna
- FM xmitter – opcje bezprzewodowego transmitera FM. Za jego pomocą można używać bezprzewodowych słuchawek wyposażonych w odbiornik FM. Zasięg do ok. 5 metrów.  
  
- FM xmitter – włączanie nadajnika FM, kiedy jest włączony, dźwięk nie wydobywa się z głośnika, zakres <ON/OFF>

- FM frequency - częstotliwość nadajnika FM, należy wybrać odpowiednią zgodną ze słuchawkami, aby uniknąć fałszywych sygnałów, poprzez przypadkowe połączenie się z obca częstotliwością zakres  $<70 \div 108 \text{ [Hz]}>$ , skok co 0.1Hz
- FM volume – głośność nadajnika FM  $<-12, -8, -4, 0, 4, 8, 12>$

**HW OPTIONS** – (Hardware Options), opcje powiązane ze strojeniem cewki i zasilaniem

- Coil balance – opcje służące do kalibrowania balansu cewki
- Balance – po włączeniu tej opcji ukazują się parametry, które można nazwać , X [ $\Omega$ ], R [ $\Omega$ ],  $\alpha$  i M, oraz tryby pracy. Są one podpisane na obrazku poniżej.

Wykrywacz mierzy sygnał w pozycji  $0^\circ$  i  $90^\circ$ . Te wartości to X (składowa reaktancyjna) i R (składowa rezystancyjna).



Rys. 7.4 – Wykres fazowy

Zatem parametr M stanowi:

$$M = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Najważniejszym jednak parametrem jest kąt fazowy  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan \left( \frac{R}{X} \right)$$



W drugiej linii znajdują się litera oznaczająca tryb pracy:

- „B” – Balance
- „D” – Desired balance
- „N” – No compensator

- Desired balance – wartość pożądanego balansu cewki. Ustawiane są wartości amplitudy i fazy potrzebnych do balansowania cewki. Wartości te ustawia się przy pomocy przycisków UP, DOWN, LEFT i RIGHT, aby osiągnąć pożądane.

- No compensator – rzeczywisty balans cewki w momencie kiedy kompensator jest wyłączony

- Compensator – włączanie lub wyłączanie auto-kompensatora (ON/OFF)

- Tx. Frequency – ustawianie częstotliwości cewki nadawczej Tx, zakres  $<4 \div 20\text{kHz}$ ), opcja ta również służy do strojenia układu Tx do rezonansu
- Voltmeter – pomiar napięcia zasilania, wskaźnik poziomu naładowania, możliwa kalibracja
- Up. Min – ustawia próg alertu o niskim poziomie baterii, dla dwóch ogniw litowo-jonowych 3500mAh połączonych szeregowo powinna być ustawiona na 6.0V
- Ferrite zero – automatyczna opcja strojenia pozwalająca na ustawienie zera na skali VDI, czyli kalibracja za pomocą ferrytu pozwalająca na ustalenie punkt odniesienia potrzebnego do poprawnego działania dyskryminacji. Rozpoznawanie metali działa na zasadzie przesunięć fazowych i wynikających z nich kątów fazowych  $\phi$ . Podczas kalibracji urządzenie ustawia kąt fazowy ferrytu na  $0^\circ$ . Uruchamia się ją przy pomocy przycisków UP lub DOWN. Po jego uruchomieniu przez ok. 4 sekundy należy poruszać ferrytowym obiektem nad sondą wykrywacza. Nie powinno się ferrytu zbyt blisko zbliżać do sondy.

Możliwa jest manualna kalibracja za pomocą przycisków LEFT i RIGHT. W tym przypadku poziom odpowiedzi jest pokazywany w górnej linii. Należy poruszać ferrytowym obiektem, zmieniając kąt rotacji.

W obu sytuacjach po ustaleniu kąta fazowego ustawienia należy zapisać przyciskiem OK, przycisk ESC skutkować będzie niezapisaniem ustawień.

**USER PROFILE** – ustawienia powiązane z preferencjami użytkownika

- Load settings – ładowanie ustawień
- Save settings – zapisywanie ustawień
- Factory reset – reset „fabryczny”, ustawienia default

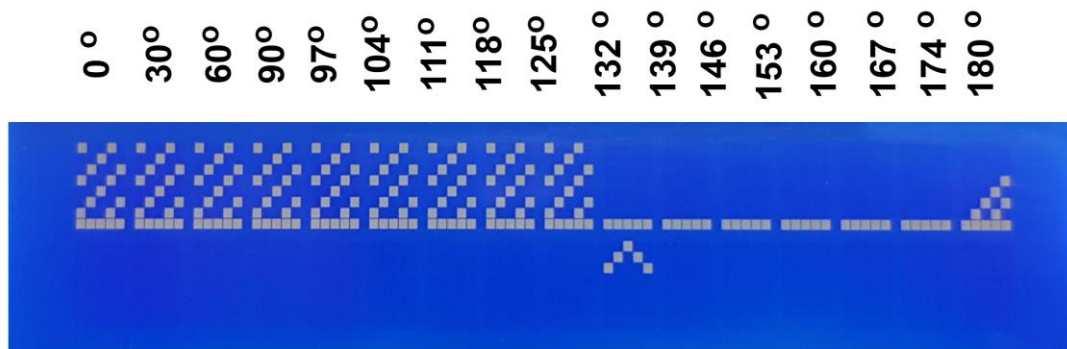
**PWM** – modulacja szerokości impulsów (Pulse Width Modulation), zakres <0;64>, ustawianie za pomocą przycisku LEFT i RIGHT, w tej linii jest również podany prąd który płynie przez cewkę nadawczą Tx. Wartość powinna wynosić od 70 – 100 mA, lecz dla różnych sond może się różnić. Im wyższa wartość tym większy wpływ gleby na urządzenie. Dla zmineralizowanych gleb powinno się używać 100 i więcej, zaś dla piaszczystej lub czarnoziemiu można zmniejszyć do 60 – 80 mA.

**BL LEVEL** – stopień podświetlenia ekranu LCD (Backlight Level), bardzo przydatna opcja ze względu na możliwość ustalenia kompromisu niski pobór mocy/dobra widoczność.

**BACKLIGHT** – podświetlenie ekranu LCD <ON/OFF>

**LAG.SINGAL GROUND** – opóźnienie signografu pozwalające na lepszą kontrolę położenia obiektu w segmencie VDI, zakres <0 ÷ 31>

**MASK** – opcja pozwala na włączenie/wyłączenie każdego z 16 sektorów skali VDI, górny rząd wyświetlacza reprezentuje skale VDI, zacienione kwadraty są maskowane, w dolnym rzędzie znajduje się znacznik. Do manewrowania używa się przycisków LEFT i RIGHT, zaś do nakładania lub ściągania maski – UP i DOWN. Poniżej widok na submenu MASK i zakres kąta fazowego jaki obejmuje poszczególne maski.



Rys. 7.5 – Poszczególne kąty fazowe na signografie

**STONE MASK** – filtracja kamieni, zakres <OFF/1°÷7°>

**SMOOTH** – low/medium/high

**FILTER** – opcja ta stanowi filtr gleby (Ground Filter), pozwala na tłumienie efektu mineralizacji gleby na wejściu (sondzie) wykrywacza, odpowiednio wybrana pozwala zwiększyć głębokość wykrywania i pozwala skonfigurować wykrywacz pod prędkość poszukiwania (poruszania wykrywaczem). Zmniejszenie filtracji gleby na glebie nisko zmineralizowanej pozwala na zwiększenie głębokości detekcji, jednak gdy gleba jest mocno zmineralizowana efekt będzie odwrotny. Poziomy filtracji są następujące:

- Very slow – bardzo wolny
- Slow - wolny
- Normal - normalny
- Fast - szybki
- Very Fast - bardzo szybki

Wartości zmienia się przyciskiem LEFT i RIGHT i pozostawia bez zapisu.

**GB TRACK** – ustawienie prędkości regulacji zmian w gruncie przez urządzenie, zakres <AUTO/OFF>

## 8. TESTY URZĄDZENIA

### 8.1 – Kalibracja urządzenia

Przed rozpoczęciem testów, należy skalibrować sondę względem bloku elektroniki wykrywacza. Pierwszą czynnością jest ustalenie częstotliwości pracy cewki Tx i prądu jaki przez nią płynie, kolejno 8426Hz i 120 mA. Aby wyeliminować zakłócenia autor pracy skorzystał z opcji Barrier i ustawił jej wartość na 10. Kolejny krok stanowi strojenie ferrytem. Proces ten jest szczegółowo opisany w rozdziale 7.3.



Rys. 8.1 – Rdzeń ferrytowy użyty do strojenia

### 8.2 – Test kąta fazowego

W celu zbadania kąta fazowego autor niniejszej pracy wybrał kilka metali i wykonał pomiar poprzez wskaźnik wbudowany w urządzenie. Kąt fazowy  $\phi$  odpowiada za dyskryminację metali w wykrywaczu.

- Samorodek żelaza (5cm x 5cm) -  $\phi = -76$
- Płytko stalowa (4cm x 8cm) -  $\phi = -41$
- Gwóźdź -  $\phi = -30$
- Folia aluminiowa (5cm x 5cm) -  $\phi = 7$
- Płytko niklowa (5cm x 5cm) -  $\phi = 25$

- Złoty pierścionek (próba 925) –  $\phi = 45$
- Kapsel aluminiowy -  $\phi = 52$
- Srebrny pierścionek (próba 925) -  $\phi = 85$

Wartości kąta fazowego są zgodne z naturą rezystancyjną/reaktywną poszczególnych metali.

### 8.3 – Test głębokości

W celu zbadania głębokości wykrywania autor wykonał tzw. test powietrzny. Nad płasko umiejscowioną sondą poruszany był obiekt badany, zaś przyrządem pomiarowym była miarka. Odległość w której wykrywacz zaczął się wzbudzać oznaczono jako h.

- Samorodek żelaza (5cm x 5cm) - h = 45cm
- Płytko stalowa (4cm x 8cm) - h = 42cm
- Gwóźdź - h = 28cm
- Folia aluminiowa (5cm x 5cm) - h = 24cm
- Płytko niklowa (5cm x 5cm) - h = 34cm
- Złoty pierścionek (próba 925) – h = 21cm
- Kapsel aluminiowy - h = 29cm
- Srebrny pierścionek (próba 925) - h = 25cm

### 8.3 – Test głębokości dla wersji z platformą

Pomiary kąta fazowego dla wersji z platformą nie różniły się znacząco od pomiarów w wersji z obudową, wzrosła jednak głębokość wykrywania.

- Samorodek żelaza (5cm x 5cm) - h = 48cm
- Płytki stalowa (4cm x 8cm) - h = 44cm
- Gwóźdź - h = 35 cm
- Folia aluminiowa (5cm x 5cm) - h = 29cm
- Płytki niklowa (5cm x 5cm) - h = 40 cm
- Złoty pierścionek (próba 925) – h = 27cm
- Kapsel aluminiowy - h = 36 cm
- Srebrny pierścionek (próba 925) - h = 32cm

## 9. PODSUMOWANIE

Autorowi pracy udało się zrealizować założone przez siebie cele.

Probleмами okazały się być:

- Lutowanie najmniejszych elementów SMD i układów scalonych
- Uzyskanie równomiernej rezystancji w ekranie grafitowym
- Umieszczenie cewek w obudowie tak, aby napięcie niezrównoważenia pozostało korzystne
- Zalanie sondy żywicą, aby ta utrzymała pożądane parametry

Urządzenie można zmodernizować przez:

- Wymianę podzespołów na odpowiedniki o korzystniejszych parametrach
- Poświęcenie większej uwagi parametrom wykrywacza w menu i ich empiryczny dobór
- Obniżenie napięcia niezrównoważenia przez lepsze usztywnienie zwojów cewki (np. rozrzedzenie żywicy epoksydowej poprzez podgrzanie jej, co pozwoli na lepsze przesączenie zwojów)
- Korzystniejsze ułożenie drutu ekranowego
- Wbudowanie modułu do ładowania baterii litowo-jonowych

## **Bibliografia:**

- [1] Inside the metal detector/Second Edition - George Overton, Carl Moreland
- [2] STM32F100x4 STM32F100x6 STM32F100x8 STM32F100xB - Low & medium-density value line, advanced ARM®-based 32-bit MCU with 16 to 128 KB Flash, 12 timers, ADC, DAC & 8 comm interfaces datasheet
- [3] C. Bruschini - A Multidisciplinary Analysis Of Frequency Domain Metal Detector for Humanitarian Demining
- [4] KT0830L - Monolithic Digital Stereo FM Transmitter Radio-Station-on-a-Chip™ datasheet
- [5] 34119 - Low Power Audio Amplifier datasheet
- [6] AN2834 - How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers application note
- [7] AN2837 – Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs application note
- [8] 2x16 LCD datasheet
- [9] LD1117 – Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator datasheet
- [10] – <https://components101.com/displays/16x2-lcd-pinout-datasheet>
- [11] – <https://pl.wikipedia.org/wiki/Samoindukcja>
- [12] – MCP601 - 2.7V to 6.0V Single Supply CMOS Op Amp datasheet
- [13] - [https://fandy.ucoz.org/publ/metalloiskatel\\_quot\\_kvazar\\_quot\\_quot\\_quasar\\_quot/2](https://fandy.ucoz.org/publ/metalloiskatel_quot_kvazar_quot_quot_quasar_quot/2)
- [14] – Texas Instruments Application Report Understanding the I2C Bus
- [15] – Tomislav Berend - Metal Detector
- [16] – 24C08B - 8K/16K 5.0V I2C™ Serial EEPROMs datasheet
- [17] - MF-MSMF Series - PTC Resettable Fuses
- [18] - <https://en.wikipedia.org/wiki/DMX512>
- [19] - 8K16K 5.0V I2C™ Serial EEPROMs
- [20] - AN1015 - Software techniques for improving microcontrollers EMC performance
- [21] - Carl Moreland - Coil Basics
- [22] - Chemia. Małgorzata Wiśniewska (red.). Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne