



A G H

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ FIZYKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ

KATEDRA FIZYKI MEDYCZNEJ I BIOFIZYKI

Praca dyplomowa

Projekt i test analizatora stężenia metanu w powietrzu wentylacyjnym
kopalni węgla

Project and test of methane concentration analyser for VAM application

Autor: Łukasz Witkowski
Kierunek studiów: Fizyka Techniczna
Opiekun pracy: dr inż. Jarosław Nęcki

Kraków, 2023

*Składam serdeczne podziękowania opiekunowi pracy
Panu dr. mgr. Jarosławowi Nęckiemu
za życzliwość, cierpliwość oraz
stworzone możliwości rozwoju
podczas pisania nieniejszej pracy.*

*Chciałbym również szczególnie podziękować
Panu dr. inż. Jakubowi Bartyzelowi
oraz Panu mgr. inż. Pawłowi Jagodzie
za wsparcie w realizacji projektu
oraz cenne wskazówki.*

Spis treści

1 Wstęp i cel pracy	4
2 Podstawy fizyczne urządzenia pomiarowego	6
2.1 Zasada działania analizatora	6
2.2 Prawo Lamberta-Beera	6
2.3 Zasada działania kluczowych elementów	8
3 Projektowanie – etap koncepcyjny	13
3.1 Baza danych HITRAN i wybór długości fali	13
3.2 Dobór komponentów	17
3.3 Symulacje osłabienia wiązki	28
3.4 Symulacje przepływu oraz mieszania	34
3.5 Geometria komory i drogi optycznej	36
4 Implementacja fizyczna	40
4.1 Przetwornik ADC i dokładność pomiaru	40
4.2 Laser i fotodioda - podłączenie elementów	48
4.3 Geometria komory i drogi optycznej	51
4.4 Stabilizacja temperatury lasera	55
4.5 Wzmocnienie efektywnej części sygnału	56
4.6 Układ elektroniczny	57
4.7 Montaż elementów	58
5 Realizacja oprogramowania	60
5.1 Użyte technologie	60
5.2 Struktura programu	61
5.3 Działanie programu	62
6 Pierwsze testy i perspektywy rozwoju projektu	67
6.1 Pierwsze testy reakcji układu na metan	67
6.2 Reakcja układu na wilgotne powietrze	68
6.3 Reakcja układu na czynniki mechaniczne	69
6.4 Kontrola parametrów układu	70
7 Podsumowanie	74
Literatura	75

1 Wstęp i cel pracy

Niniejsza praca miała na celu zaprojektowanie i zbudowanie analizatora stężenia metanu opartego na technologii NDIR (z ang. Non-dispersive infrared). Przeznaczony on będzie do pracy przy wylocie szybu wentylacyjnego kopalni węgla. Metan jest gazem, który występuje naturalnie w złożach węgla. Wynika z tego podwyższone stężenie tego gazu w powietrzu wentylacyjnym szybu kopalnianego [1].

Główna motywacją dla wykonania projektu stanowi potrzeba monitorowania stężenia metanu. Poza dwutlenkiem węgla jest on jednym z głównych gazów odpowiedzialnych za globalne ocieplenie, a jego monitorowanie pozwala na identyfikację źródeł oraz ocenę skali ich emisji.

Dostępne są różne metody pomiaru stężenia metanu. Do najpopularniejszych z nich należą:

- NDIR – technologia wykorzystywana w tym projekcie. Opiera się na emisji wiązki laserowej o charakterystycznej długości fali z zakresu podczerwieni i osłabieniu jej przez metan. Osłabienie jest analizowane i przeliczane na stężenie metanu [2].
- FTIR (z ang. Fourier-transform infrared) – pomiar polega na naświetlaniu próbki promieniowaniem podczerwonym o szerokim zakresie długości fal. Promieniowanie po przejściu przez próbkę jest przetwarzane za pomocą interferometru fourierowskiego. Otrzymane widmo jest analizowane w celu identyfikacji składników chemicznych i określenia ich stężeń [3].
- Pellistor katalityczny – metoda polega na wykorzystaniu katalizatora, w którego obecności metan jest utleniany, generując przy tym ciepło. Pomiar stężenia metanu opiera się na pomiarze ilości wytworzonego ciepła. Metoda jest szeroko stosowana w przemyśle. Jednakże katalizatory mogą ulegać zużyciu i wymagać regularnej konserwacji oraz wymiany kalizatora [1].
- Pomiar konduktometryczny – metoda opiera się na różnicy w przewodnictwie cieplnym mierzonego gazu w porównaniu do gazu wzorcowego. Ich wadą jest możliwość zaburzenia pomiaru przez inne składniki wpływające na przewodność cieplną mieszaniny gazów [1].

Detektory NDIR oraz FTIR dostępne na rynku cechują się dużą dokładnością pomiarów i łatwością obsługi kosztem wysokiej ceny tych produktów. Układy pellistorowe oraz konduktometryczne stanowią znacznie tańsze rozwiązanie, ale jednocześnie znacznie mniej dokładne. Budowa własnego analizatora NDIR stanowi wypośrodkowanie pomiędzy ceną a jakością pomiarów. Pozwala zaoszczędzić znaczną część kosztów gotowego urządzenia, płacąc tylko za komponenty, zachowując tym samym wszystkie jego właściwości. W przypadku ewentualnych awarii bądź wątpliwości w poprawności wyników, dzięki dokładnej

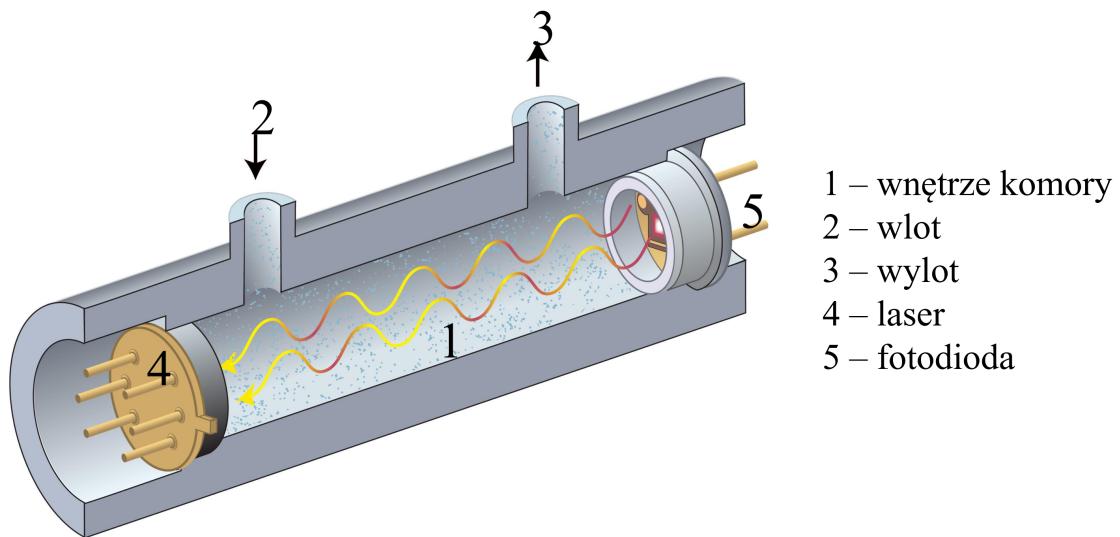
znajomości budowy i działania możliwa będzie ich weryfikacja oraz samodzielna naprawa, bez konieczności wysyłania urządzenia do autoryzowanych serwisów.

W ramach pracy należało zapoznać się z działaniem istniejących urządzeń. Następnie dokonać przeglądu dostępnych na rynku elementów i dobrać odpowiednie dla realizowanego projektu. Należało zaprojektować odpowiednią geometrię drogi optycznej, zaprojektować układ elektroniczny zapewniający działanie urządzenia oraz napisać oprogramowanie pozwalające na wykonywanie pomiaru, dające możliwość ciągłej obserwacji na wykresie oraz zapewniające zapis na zewnętrzny nośnik pamięci. Całość należało złożyć w jedno urządzenie, możliwe do łatwego transportu i wygodnej obsługi.

2 Podstawy fizyczne urządzenia pomiarowego

2.1 Zasada działania analizatora

Na rysunku 2.1 została schematycznie przedstawiona zasada działania analizatora NDIR. Komora¹ pomiarowa posiada na końcach wlot² i wylot³, umożliwiające wymianę gazu w jej środku. Wewnątrz komory generowana jest przez laser⁴ wiązka światła o ścisłe określonej długości fali podczerwonej. Po przejściu przez mieszaninę gazów zawierającą metan, wiązka światła podczerwonego jest osłabiana, po czym pada na fotodiode⁵ czującą na ten zakres długości fal. Generowany jest w niej sygnał elektryczny, który następnie jest wzmacniany i mierzony. Siła sygnału jest zależna od stężenia metanu wewnątrz komory – im większa zawartość absorbującego gazu tym słabszy sygnał na wyjściu układu. Na tej podstawie uprzednio kalibrując urządzenie możliwe jest wyznaczenie stężenia metanu w nieznanej próbce gazu.



- 1 – wewnętrze komory
- 2 – wlot
- 3 – wylot
- 4 – laser
- 5 – fotodioda

Rysunek 2.1: Schemat przedstawiający zasadę działania analizatora NDIR (opracowanie własne na podstawie [2])

2.2 Prawo Lambert-Barea

Zjawiskiem fizycznym, które leży u podstaw działania analizatora jest osłabienie wiązki światła przez ośrodek absorbujący, opisywane przez prawo Lambert-Barea. Mówi ono, że osłabienie natężenia światła zależy od długości drogi optycznej, stężenia substancji absorbującej wzdłuż drogi optycznej oraz od współczynnika absorpcji, charakterystycznego dla danego gazu i danej długości fali. Możliwe jest zapisanie prawa w postaci równania, po spełnieniu odpowiednich warunków takich jak:

- monochromatyczność wiązki światła,
- kolimacja wiązki światła (brak rozbieżności wiązki),
- stężenie nie przekraczające kilku procent.

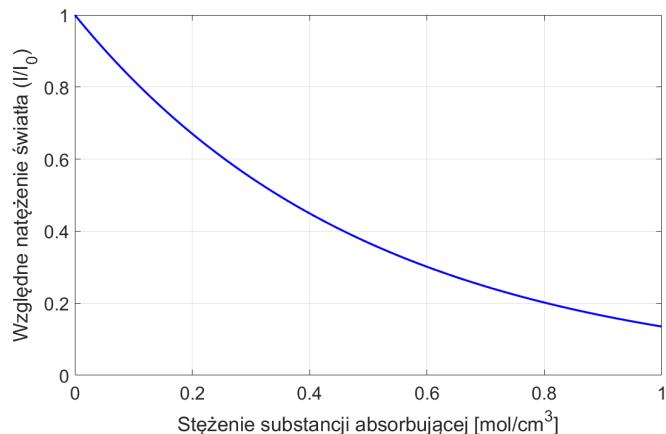
Przyjmuje ono wtedy następującą postać:

$$I = I_0 e^{-\epsilon l c} \quad (2.1)$$

gdzie:

- I_0 – natężenie światła przed warstwą absorbującą,
- I – natężenie światła po przejściu przez warstwę absorbującą,
- ϵ – współczynnik absorpcji światła (molowy),
- l – długość drogi optycznej,
- c – stężenie molowe substancji absorbującej,

Na rysunku 2.2 przedstawiony został przykładowy wykres zależności względnego natężenia światła od stężenia gazu po przejściu przez drogę optyczną o długości 10 m i współczynnika absorpcji światła równym 0.2.



Rysunek 2.2: Przykładowy wykres zależności względnego natężenia światła od stężenia

Wprowadzając nową wielkość zwaną absorbancją wyrazoną wzorem 2.2, możliwe jest zapisanie omawianego prawa w uproszczonej postaci, zgodnie ze wzorem 2.3:

$$A = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.2)$$

$$A = \epsilon l c \quad (2.3)$$

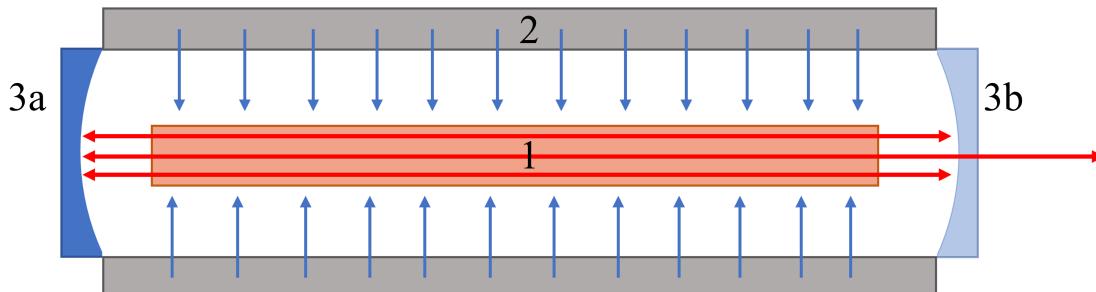
Wykres 2.2 jest wykresem teoretycznym, stworzonym na podstawie wzoru 2.1. W rzeczywistości dla dużych stężeń zaczyna zanikać liniowość pomiędzy absorbancją a stężeniem substancji absorbującej, przestaje wtedy być spełniony jeden z warunków i należy uwzględnić to przy projektowaniu urządzeń mierzących duże stężenia [4].

2.3 Zasada działania kluczowych elementów

Do kluczowych elementów wchodzących w skład analizatora należy źródło monochromatycznego światła podczerwonego, które stanowi laser; odbiornik sygnału świetlnego, który stanowi fotodioda oraz układ umożliwiający odczytywanie sygnału generowanego przez fotodiodę, który w przypadku projektowanego analizatora stanowi przetwornik analogowo-cyfrowy. Niniejszy podrozdział poświęcony został na opisanie zasad działania wymienionych elementów.

Laser

Laser (z ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) to urządzenie, które wytwarza wiązkę światła bazując na zjawisku fizycznym zwanym emisją wymuszoną. Zasada działania lasera opiera się na trzech podstawowych elementach: ośrodek czynny, układ pompujący i rezonator optyczny. Budowa lasera została schematycznie przedstawiona na rysunku 2.3.

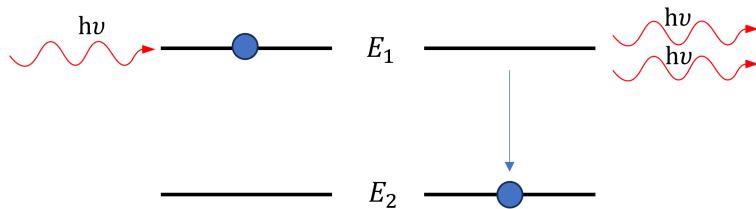


Rysunek 2.3: Schemat ilustrujący budowę lasera (opracowanie własne na podstawie [6])

- 1. Ośrodek czynny – jest to substancja, która może być wzbudzana do stanu o wyższej energii, na stosunkowo długi czas w swojej skali (ułamki milisekund), jest to tak zwany stan metatrwały. Medium to może być w postaci stałej, ciekłej lub gazowej. Elektrony w atomach lub cząsteczkach przenoszone są ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.
- 2. Układ pompujący – jest to źródło energii, które dostarcza energię do ośrodka czynnego, w celu wzbudzenia jego atomów lub cząsteczek. Energia dostarczana może być na różne sposoby w zależności od typu lasera na przykład poprzez lampę błyskową, przepływ prądu (wyładowanie elektryczne) lub inną diodę laserową. Układ powinien cechować się jak największą wydajnością tak aby możliwe było uzyskanie tak zwanej inwersji obsadzeń.

- 3. Rezonator optyczny – w najprostszej wersji jest to układ składający się z dwóch zwierciadeł ustawionych naprzeciwko siebie na końcach ośrodka czynnego. Jedno ze zwierciadeł jest półprzepuszczalne^{3b}, umożliwiając wydostawanie się światła na zewnątrz układu. Taki układ sprawia, że wewnątrz lasera wzmacniane są tylko fotony poruszające się równolegle do ośrodka, a pozostałe fotony są pochłaniane przez ścianki. Taka konfiguracja wzmacnia wszystkie fotony poruszające się wzdłuż osi układu, pochodzące z różnych przejść energetycznych, a tym samym o różnej długości fali. Chcąc uzyskać wiązkę monochromatyczną o zadanej długości fali stosuje się wewnątrz układu dodatkowe elementy takie jak na przykład siatki dyfrakcyjne lub dodatkowe zwierciadła, które tworzą filtry interferencyjne.

Przed rozpoczęciem pracy lasera ośrodek czynny¹ znajduje się w stanie podstawowym. Praca lasera rozpoczyna się od dostarczania energii poprzez układ pompujący² do ośrodka, przenosząc atomy lub cząsteczki do stanu wzbudzonego. Gdy ponad połowa z nich znajduje się w stanie wzbudzonym mówimy o tak zwanej inwersji obsadzeń i rozpoczyna się akcja laserowa. Początkowo fotony są emitowane wskutek emisji spontanicznej w losowych kierunkach. Te, które poruszają się w równoległy do osi ośrodka są odbijane przez zwierciadła³ z powrotem, pozostałe natomiast są absorbowane przez ścianki. W kolejnym etapie zaczyna dominować emisja wymuszona nad spontaniczną. Jest to zjawisko, w którym we wzbudzony atom wlatuje foton o energii równej energii wzbudzenia. Następstwem tego jest emisja dwóch fotonów o identycznych parametrach takich jak długość fali, faza, polaryzacja oraz kierunek (rysunek 2.4) [5].

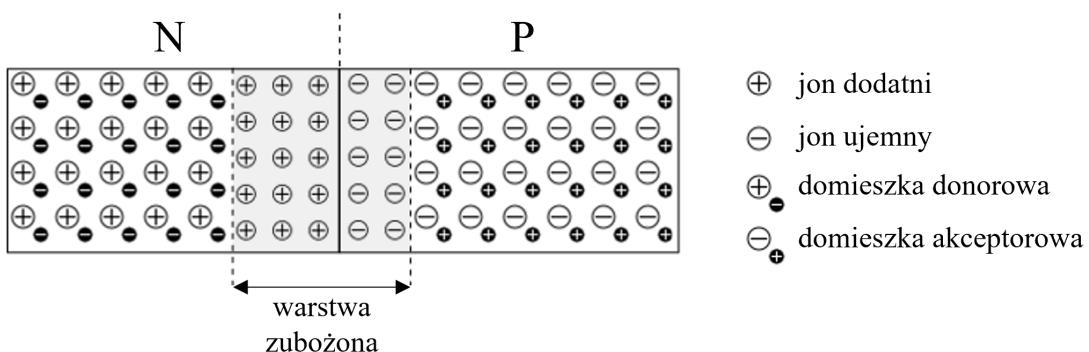


Rysunek 2.4: Proces emisji wymuszonej

Fotony te są wielokrotnie odbijane między zwierciadłami układu rezonansowego³, co prowadzi do wzmacnienia równoległej wiązki światła. Warunkiem koniecznym dla utrzymania akcji laserowej jest równowaga pomiędzy energią dostarczaną przez układ pompujący, a energią traconą przez fotony nie biorące udziału we wzmacnieniu oraz wychodzące z układu przez zwierciadło częściowo przepuszczalne i tworzące wyjściową wiązkę lasera. Uzyskana wiązka jest spójna, ma małą rozbieżność oraz często jest monochromatyczna, o bardzo wąskiej szerokości linii spektralnej. Sprawia to, że uzyskiwana jest bardzo duża energia w wąskim zakresie długości fali [5].

Fotodioda

Fotodioda jest elementem półprzewodnikowym, przetwarzającym padające na niego światło na prąd elektryczny. Zbudowana jest ona z dwóch warstw półprzewodników typu p, w której nośnikiem większościowym są dziury, oraz typu n, w której nośnikiem większościowym są elektrony. Tworzą one razem złącze p-n. W złączu występuje tak zwana warstwa zubożona, stanowiąca obszar, w którym powstaje równowaga termodynamiczna pomiędzy siłami dyfuzji (dziury chcą samoistnie przemieszczać się do obszaru n gdzie jest ich mało, i na odwrót) oraz siłami kulombowskimi, które powstają wskutek różnicy potencjałów. W warstwie tej dochodzi do rekombinacji dziur z elektronami (rysunek 2.5) [7].



Rysunek 2.5: Schemat budowy fotodiody (opracowanie własne na podstawie [7])

Gdy na warstwę zubożoną trafi foton dochodzi do zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego i powstaje wolna para nośników: elektron i dziura. Przemieszczając się pod wpływem wewnętrznego pola elektrycznego powodują powstanie różnicy potencjałów i przepływ prądu w obwodzie. Fotodioda w zależności od sposobu jej podłączenia może pracować w dwóch trybach pracy:

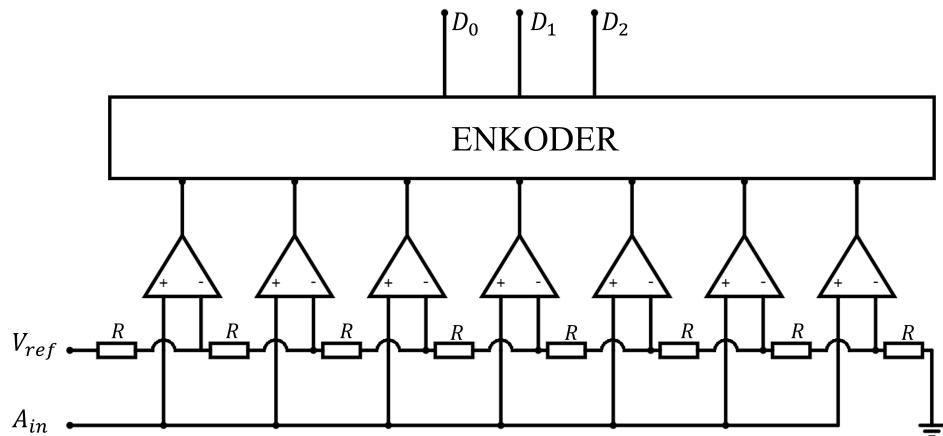
- tryb fotowoltaiczny – w tym trybie fotodioda działa zgodnie z powyższym opisem, pracując jako źródło prądu elektrycznego, stanowi on niejako miniaturowy panel fotowoltaiczny
- tryb fotoprzewodzenia – w tym trybie dioda jest spolaryzowana przez zewnętrzne napięcie w kierunku zaporowym, działa podobnie do fotorezystora, którego opór elektryczny zależy od natężenia światła jakie na niego pada

W projekcie użyto fotodiody działającej bez zewnętrznej polaryzacji. Prąd wytwarzany przez taką fotodiodę jest bardzo mały – rzędu kilku μA , przez co konieczne jest zastosowanie odpowiedniego wzmacniacza.

Przetwornik ADC

Przetwornik analogowo-cyfrowy jest urządzeniem mającym za zadanie zamianę sygnału analogowego (napięcie lub natężenie prądu) na sygnał cyfrowy. Stanowi on pomost pomiędzy rzeczywistym światem ciągłych sygnałów analogowych a światem skwantowanych sygnałów cyfrowych możliwych do analizy przez komputery. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi przetwornik analogowo-cyfrowy są:

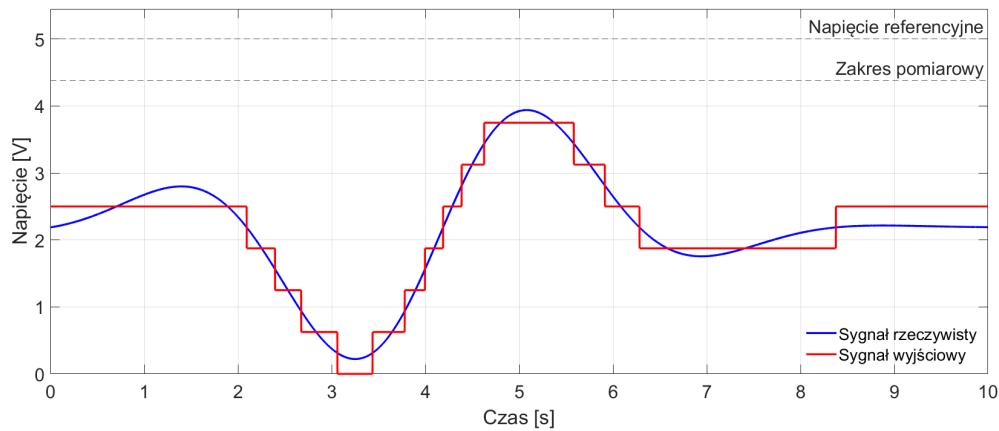
- Rozdzielcość – liczba bitów użytych do reprezentacji wartości analogowej w formie cyfrowej. Na przykład 10 bitów pozwala na podzielenie danego zakresu na $2^{10} = 1024$ przedziałów.
- Zakres pomiarowy – zakres napięć, które przetwornik jest w stanie przetworzyć.
- Częstotliwość próbkowania – określa ile próbek sygnału analogowego jest przetwarzanych w ciągu sekundy. Wyrażana jest hertzach [Hz] lub próbkach na sekundę [SPS].
- Niedoskonałość – przetwornik jest narażony na różnego rodzaju czynniki zaburzające poprawność jego działania, są one opisywane na przykład poprzez: nieliniowość całkową, nieliniowość różniczkową, błąd przesunięcia zera, błąd skali, wrażliwość na temperaturę .



Rysunek 2.6: Układ elektroniczny przetwornika ADC o porównaniu bezpośrednim (opracowanie własne na podstawie [8])

Ze względu na sposób działania możemy wyróżnić kilka rodzajów przetworników. Na rysunku 2.6 został przedstawiony schemat pokazujący działanie najprostszego typu przetwornika analogowo-cyfrowego opartego o porównanie bezpośrednie. Przetwornik ten jest 3-bitowy co oznacza, że może on przyjmować jedną z 8 wartości. Osiem połączonych ze sobą szeregowo rezistorów o rezystancji R tworzy dzielnik napięcia. Po podłączeniu do niego

napięcia odniesienia V_{ref} pomiędzy rezystorami dostępnych jest 8 wartości napięć. Mierzone napięcie jest porównywane z każdym z pośrednich napięć odniesienia przy pomocy komparatorów. W zależności od wartości mierzonego napięcia różna liczba wyjść komparatorów będzie przyjmowała stan wysoki. Są one kierowane następnie na enkoder, który przekształca wartości 8 stanów wejściowych na liczbę od 0 do 7 przedstawioną w reprezentacji zero-jedynkowej na 3 wyjściach cyfrowych. Liczba ta na końcu jest przekazywana do dalszej części układu (np. mikrokontrolera) przez interfejs komunikacyjny np. SPI, I2C lub równoległy.



Rysunek 2.7: Wykres przedstawiający działanie przetwornika ADC; niebieska krzywa – sygnał wejściowy; pomarańczowa krzywa – sygnał wyjściowy

Pozostając przy przykładzie przetwornika 3-bitowego, na rysunku 2.7 przedstawione zostało jego działanie. Na wykresie widoczna jest niebieska krzywa będąca rzeczywistym ciągłym sygnałem wejściowym oraz czerwona krzywa, przedstawiająca skwantowany wynik pracy przetwornika. Ponadto na wykresie przerywaną linią zaznaczony został poziom napięcia referencyjnego równy 5V oraz wartość maksymalnego napięcia zakresu pomiarowego wynoszącego 4,375 V. Wartość ta jest równa różnicy między napięciem referencyjnym V_{ref} a tak zwanym LSB (z ang. Least Significant Bit) wynoszącym $V_{ref}/2^N = 0,625V$. Dokładność przetwornika zwiększa się wraz z liczbą bitów - im większa tym mniej widoczne są schodki na sygnale wyjściowym i wykres ten lepiej odzwierciedla rzeczywisty sygnał.

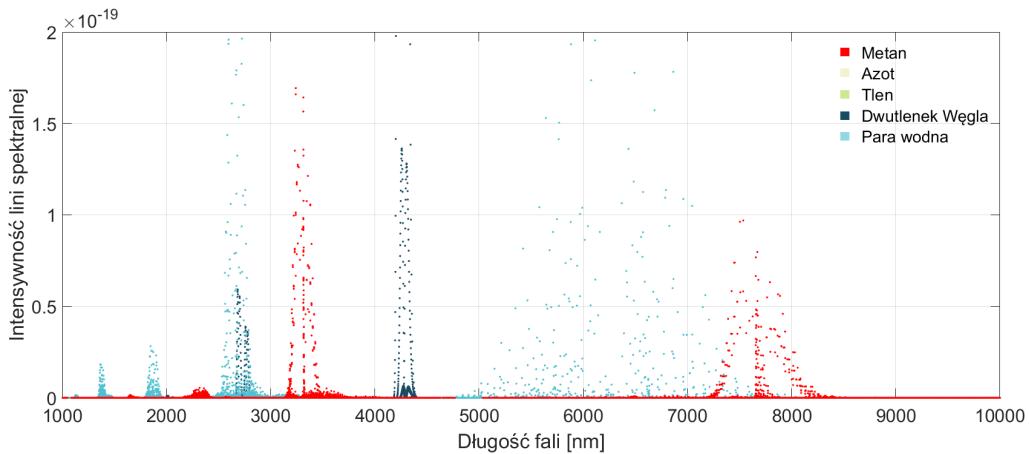
3 Projektowanie – etap koncepcyjny

3.1 Baza danych HITRAN i wybór długości fali

Wartość współczynnika absorpcji jest charakterystyczna dla danego gazu i dla ścisłe określonej długości fali. Dlatego też przed przystąpieniem do pracy nad budową analizatora, przeanalizowano widmo absorpcji metanu w poszukiwaniu długości fali, dla których występuje duża wartość współczynnika absorpcji. Ponadto podczas doboru długości kierowano się też tym, aby absorbcja z innych powszechnie występujących gazów (tlen, azot, dwutlenek węgla i para wodna) w jak najmniejszym stopniu wpływała na osłabienie, tak aby nie było wątpliwości, skąd ono pochodzi.

Do tego celu posłużyono się ogólnodostępna bazą danych Hitran wykorzystywana w spektroskopii molekularnej. Zawiera ona szczegółowe informacje dotyczące linii absorpcyjnych dla różnych cząsteczek chemicznych (łącznie z ich odmianami izotopowymi), takie jak intensywność, szerokość czy liczbę falową.

W celu prześledzenia spektrum pobrano dane dotyczące metanu oraz innych gazów w zakresie podczerwieni od 1000 nm do 10 000 nm, a następnie przedstawiono je na wspólnym wykresie zależności intensywności linii spektralnej od długości fali (rysunek 3.1).

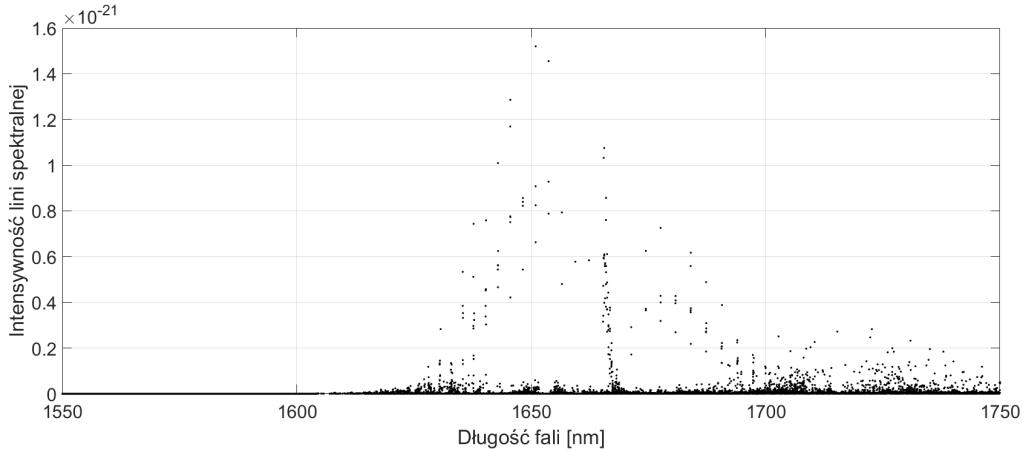


Rysunek 3.1: Widmo absorpcji metanu oraz innych gazów (na podstawie danych [9])

Na wykresie 3.1 widoczne są 4 zagęszczenia linii spektralnych metanu, kolejno w okolicy 1650 nm, 2300 nm, 3300 nm oraz 7600 nm. Ostania z nich zostaje odrzucona ze względu na zachodzące na nią linie spektralne pary wodnej oraz dużą długość fali mogącą powodować problemy w konstruowaniu układów optycznych. Kolejne dwie długości, idąc w kierunku bliższej podczerwieni, mogłyby stanowić dobry wybór jednak zostają one odrzucone ze względu na brak dostępności źródeł promieniowania w tym zakresie długości fal lub ich bardzo wysoką cenę. Pozostała długość fali 1650 nm, charakteryzuje się najniższą intensywnością linii spektralnych spośród wymienionych czterech, jednakże jest ona odpowiednia ze względu na brak kolizji z innymi gazami oraz dostępność na rynku

laserów pracujących w tym zakresie. Ponadto długość ta jest wykorzystywana w niektórych rozwiązaniach komercyjnych, także w urządzeniach stosowanych na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

Na rysunku 3.2 przedstawiony został wykres intensywności linii spektralnych metanu w okolicy wybranej długości fali.



Rysunek 3.2: Widmo absorpcji metanu w okolicy wybranej długości fali od 1550 nm do 1750 nm (na odstavie danych [9])

Każdy z widocznych punktów na wykresie stanowi pojedyncze centrum absorpcji. Autorzy bazy danych na swojej stronie internetowej hitran.org ([9]) podają instrukcję obliczania współczynnika absorpcji na podstawie udostępnionych parametrów wraz z ich definicjami:

- S_{ij} – intensywność linii spektralnej pomiędzy poziomami energetycznymi i oraz j $[(cm^{-1})/(czsteczka \cdot cm^{-2})]$
- ν_{ij} – liczba falowa opisująca położenie linii spektralnej na widmie $[cm^{-1}]$
- γ_{ij} – szerokość połówkowa (HWHM) $[cm^{-1}]$
- δ_{ij} – przesunięcie ciśnieniowe liczby falowej linii spektralnej względem warunków w próżni $[(cm^{-1})/atm]$

Dla każdej linii spektralnej możliwe jest wyznaczenie tzw. znormalizowanej funkcji kształtu linii, będącej z matematycznego punktu widzenia rozkładem Cauchy'ego-Lorentza. Opisana jest ona wzorem 3.1:

$$f_L(\nu; \nu_{ij}, T, p) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma(p, T)}{\gamma(p, T)^2 + [\nu - \nu_{ij}^*]^2} \quad (3.1)$$

$$\gamma(p, T) = \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{n_{air}} \gamma_{air}(p_{ref}, T_{ref})(p - p_{self}) + \gamma_{self}(p_{ref}, T_{ref})p_{self} \quad (3.2)$$

$$\nu_{ij}^* = \nu_{ij} + \delta(p_{ref})p \quad (3.3)$$

gdzie:

T – temperatura [K],

T_{ref} – temperatura referencyjna wynosząca 296 K,

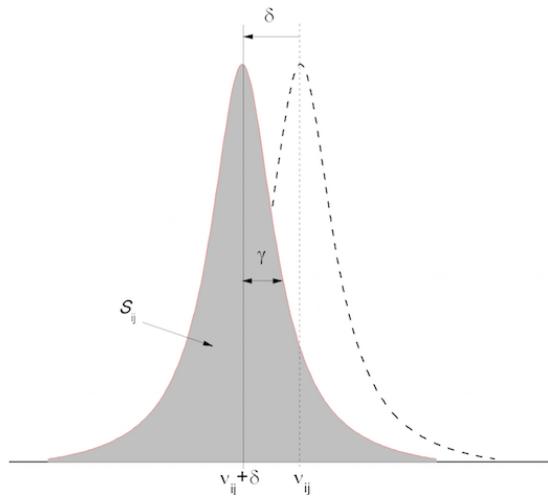
p – ciśnienie [atm],

p_{ref} – ciśnienie atmosferyczne wynoszące 1 atm,

p_{self} – ciśnienie parcjalne analizowanego gazu [atm],

n_{air} – współczynnik temperaturowy szerokości połówkowej.

Szzerokość krzywej zależy od czynnika $\gamma(p, T)$, natomiast jej maksimum jest przesunięte względem liczby falowej ν_{ij} o wartość związaną z czynnikiem δ_{ij} (rysunek 3.3). Wielkości te są zależne od temperatury i ciśnienia

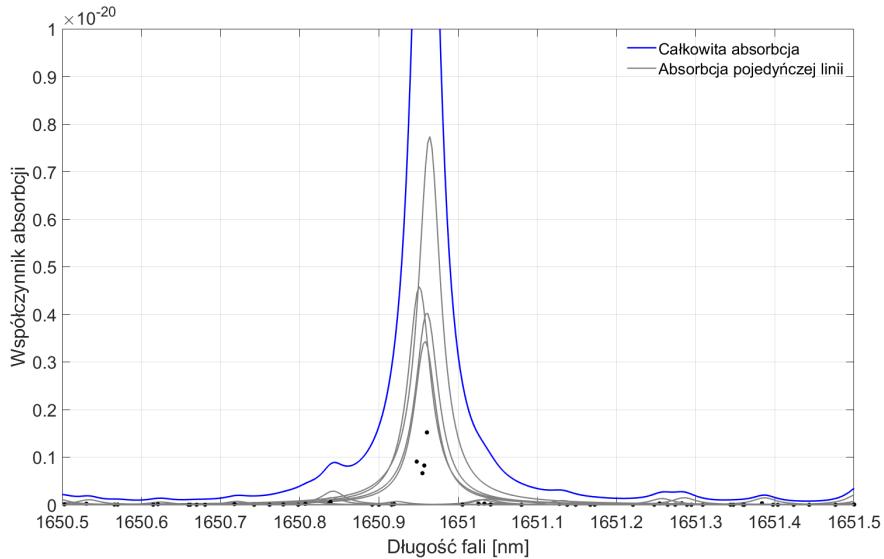


Rysunek 3.3: Schematyczne przedstawienie znaczenia parametrów używanych przy obliczaniu współczynnika absorpcji [9]

Po wyznaczeniu funkcji kształtu linii, na podstawie danych dostarczonych przez autorów bazy danych, możliwe jest wyznaczenie współczynnika absorpcji poprzez przemnożenie tej funkcji przez intensywność linii spektralnej zgodnie ze wzorem 3.4.

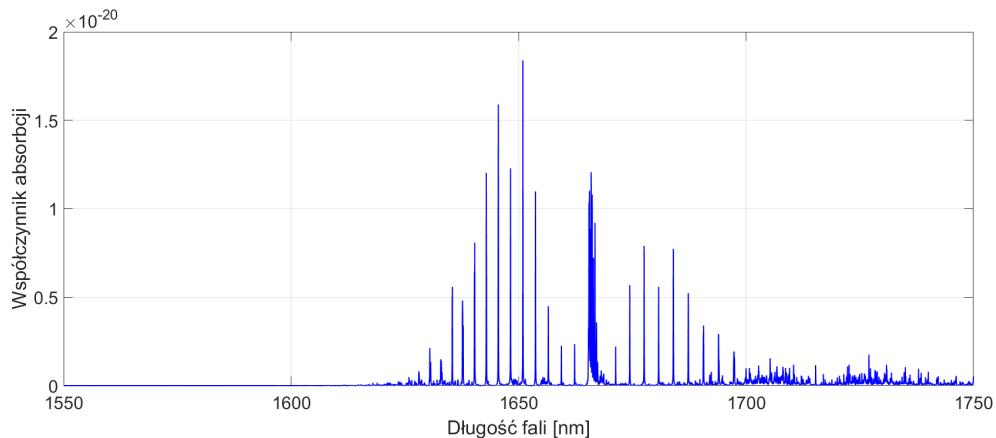
$$k_{ij}(\nu, T, p) = S_{ij} \cdot f_L(\nu; \nu_{ij}, T, p) \quad (3.4)$$

Uzyskujemy w ten sposób rozkład współczynnika absorpcji wokół pojedynczego centrum wyrażonego nie dla mola gazu lecz dla pojedynczej cząsteczki w jednostce $1/(czast \cdot cm^{-2})$. Przykładowy kształt takiego rozkładu dla widma metanu został przedstawiony na rysunku 3.4. Kolejnym krokiem w celu uzyskania pełnego spektrum jest zsumowanie wartości współczynników pochodzących od wszystkich linii spektralnych, co również zostało przedstawione na rysunku.



Rysunek 3.4: Wycinek spektrum absorpcji z wyrysowanym rozkładem współczynnika absorpcji wokół linii spektralnych. Czarne punkty - intensywność linii spektralnej; szare krzywe - współczynnik absorpcji pochodzący od pojedynczych linii spektralnych; niebieska krzywa - całkowity zsumowany współczynnik absorpcji

Całkowita wartość współczynnika absorpcji została obliczona w ten sposób dla zakresu długości fal widocznego na rysunku 3.2, tj. od 1550 nm do 1750 nm i została przedstawiona na wykresie 3.5. Wartości te posłużą do wyznaczania teoretycznego osłabienia wiązki lasera po przejściu przez komorę.



Rysunek 3.5: Wykres całkowitego współczynnika absorpcji w zakresie długości fal od 1550 nm do 1750 nm

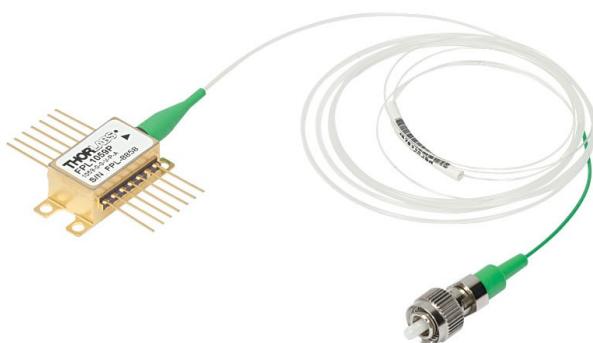
3.2 Dobór komponentów

Po wyborze długości fali w jakiej ma pracować urządzenie przystąpiono do przeglądu rynku i wyboru odpowiednich elementów. Elementy optyczne oraz urządzenia służące do ich obsługi zostały zakupione w sklepie Thorlabs, pozostałe elementy w innych Polskich sklepach elektronicznych (Botland, TME, Kamami, GOTRONIK). W tej części pracy przedstawiono parametry oraz kryteria ich doboru.

Laser

Na rynku dostępnych jest wiele rodzajów laserów, różniących się od siebie takimi parametrami jak widmo świecenia, moc czy rodzaj zabudowy. Najważniejszym z nich jest jego widmo - tak aby generował promieniowanie o długości fali jak najbardziej zbliżonej do wybranej na podstawie widma absorpcji metanu równej 1650 nm. Jeśli chodzi o moc lasera to im większa moc tym stosunkowo mniejszy wkład na promieniowanie podczerwone docierające do fotodiody z otoczenia a większy ma właściwy sygnał pochodzący z lasera. Dodatkowo fotodioda może pracować wtedy w swoim właściwym trybie i w generowanym przez nią sygnale mniejszy wkład ma tak zwany prąd ciemny. Ostatnim parametrem jest rodzaj zabudowy, dostępne są proste diody laserowe bez obudowy, diody laserowe w prostej obudowie z wyprowadzonymi 2 pinami lub lasery w rozbudowanej zabudowie typu "butterfly" posiadające wewnętrz termistor oraz chłodzenie termoelektryczne.

Biorąc pod uwagę wymienione wyżej elementy zdecydowano o wyborze lasera FPL1059P (rysunek 3.6) w z sklepie Thorlabs, cechującego się zabudową typu "butterfly". Pozwala ją ona na istotne z punktu widzenia projektu kontrolowanie temperatury lasera. Laser ten został dodatkowo wyposażony w wbudowany światłowód, ułatwiający odpowiednie skierowanie wiązki światła.



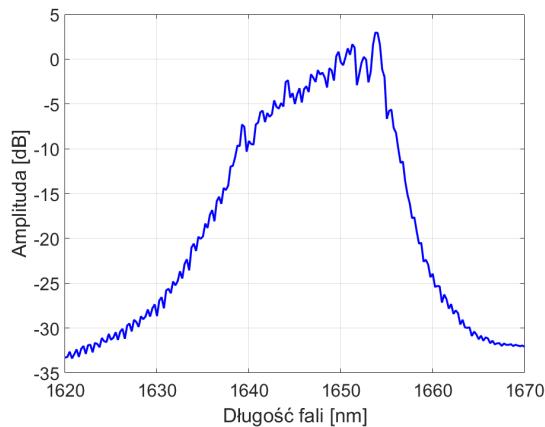
Rysunek 3.6: Zdjęcie wybranego lasera FPL1059P [10]

W tabeli 3.1 zestawione zostały najważniejsze informacje o laserze dostarczone przez producenta.

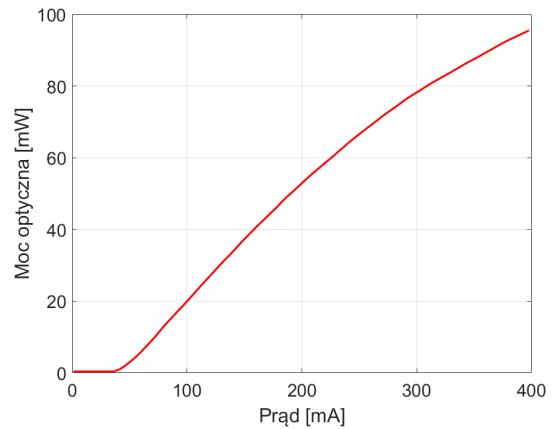
Tabela 3.1: Parametry wybranego lasera ([10])

Parametr	Min.	Typ.	Max.
Laser			
Długość fali [nm]	1630	1650	1670
Prąd pracy [mA]	-	400	500
Moc optyczna [mW]	-	80	-
Rozbieżność	-	5,76°	-
Chłodzenie Termoelektryczne TEC			
Prąd pracy [A]	-	0,25	1,5
Napięcie pracy [V]	-	0,35	3,5
Termistor			
Rezystancja termistora [$k\Omega$]	-	10	-

Na rysunku 3.7 przedstawiony wykres spektrum optycznego w warunkach normalnych oraz zależność mocy optycznej i napięcia na laserze w zależności od prądu który przez niego płynie.



(a) Spektrum optyczne



(b) Moc optyczna - prąd

Rysunek 3.7: Wykresy związane z pracą lasera FPL1059P (na podstawie danych [10])

Fotodioda

Dostępne na rynku fotodiody charakteryzują się parametrami takimi jak odpowiedź spektralna, powierzchnia światłoczuła, czy też sposób montowania. Podobnie jak w przypadku lasera najważniejszym z nich jest jego charakterystyka czułości ze względu na długość fali, która w przypadku fotodiody w głównej mierze jest zależna od rodzaju półprzewodnika z jakiego jest ona zbudowana. Te spośród dostępnych fotodiod, które swoim zakresem działania obejmują długość fali równą 1650 nm, zbudowane są na bazie materiału InGaAs. Wszystkie posiadają bardzo zbliżone spektrum. Kolejnym parametrem, który opisuje fotodiodę jest powierzchnia światłoczuła. Podobnie jak z mocą lasera im większa powierzchnia tym, większy właściwy sygnał, który generuje. Dzięki temu jest on bardziej odróżnialny od naturalnie występującego szumu elektroniki (wzmacniacza i przetwornika ADC). Ostatnim parametrem jest rodzaj montowania - dostępne są fotodiody niemontowane z wyprowadzeniami w postaci 2-3 drucików lub zamontowane w obudowie umożliwiającej podłączenie odpowiedniego do przesyłania sygnału ekranowanego przewodu. Na podstawie powyższych parametrów zdecydowano na wybór fotodiody SM05PD5A (rysunek 3.8) typu InGaAS, w zabudowie z gniazdem SMA, o powierzchni światłoczułej równej $3,1\text{mm}^2$, oferowanej przez firmę Thorlabs.



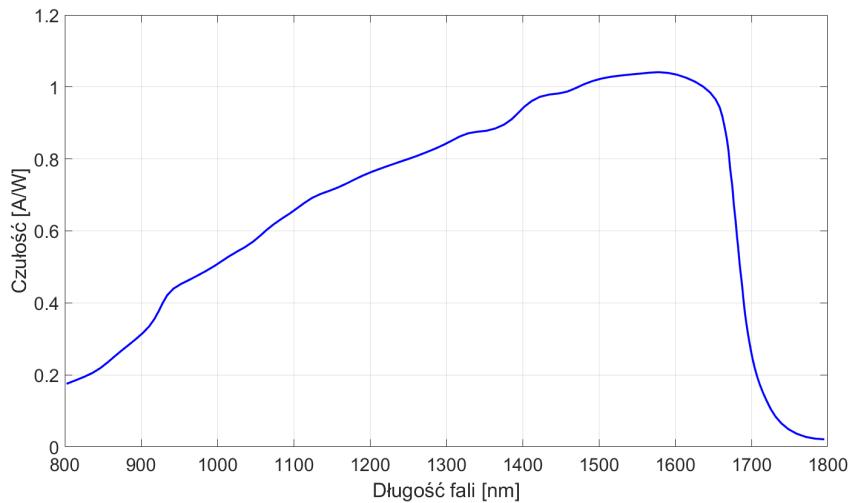
Rysunek 3.8: Zdjęcie wybranej fotodiody [11]

W tabeli 3.2 zestawione zostały najważniejsze informacje o fotodiodzie dostarczone przez producenta.

Tabela 3.2: Parametry wybranej fotodiody [11]

Parametr	Min.	Typ.	Max.
Długość fali [nm]	800	1590	1700
Czułość [A/W]	-	1,04	-
Powierzchnia światłoczuła [mm^2]	-		-
Materiał czuły	-	InGaAs	-
Temperatura pracy [°C]	-40	-	85

Na rysunku 3.9 przedstawiony został wykres odpowiedzi spektralnej fotodiody.



Rysunek 3.9: Wykres odpowiedzi spektralnej fotodiody (na podstawie danych [11])

Kolimator

Wiązka światła wytwarzana przez wybrany laser charakteryzuje się stosunkowo dużą rozbieżnością, przez co chcąc uzyskać cienką wiązkę o stałej szerokości konieczne było zastosowanie kolimatora. Różnią się one od siebie budową (liczbą i układem soczewek), a tym samym jego właściwościami. Cechami którymi można scharakteryzować kolimator są:

- Talia - szerokość wiązki w jej najwęższym punkcie
- Odległość talii od kolimatora (zwykle kilka centymetrów)
- Rozbieżność - kąt z jakim rozchodzi się wiązka (im mniejszy tym bardziej stała w czasie jest szerokość wiązki)
- Zakres długości fal pracy kolimatora

Zdecydowano o wyborze kolimatora F280APC-1550 (rysunek 3.10), którego typowe parametry zostały zawarte w tabeli 3.3

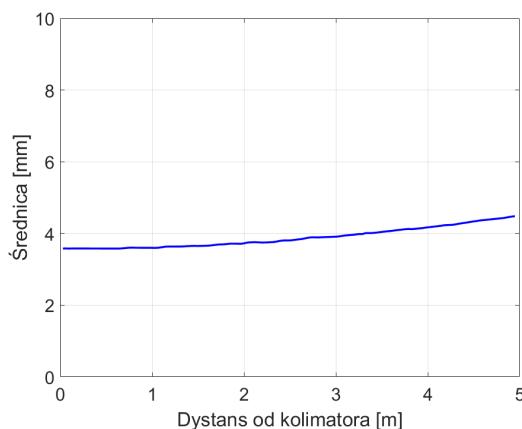
Tabela 3.3: Parametry wybranego kolimatora [12]

Parametr	Wartość
Talia	3,6 mm
Odległość talii	18,07 mm
Rozbieżność	0,032°
Długość fali	1550 nm

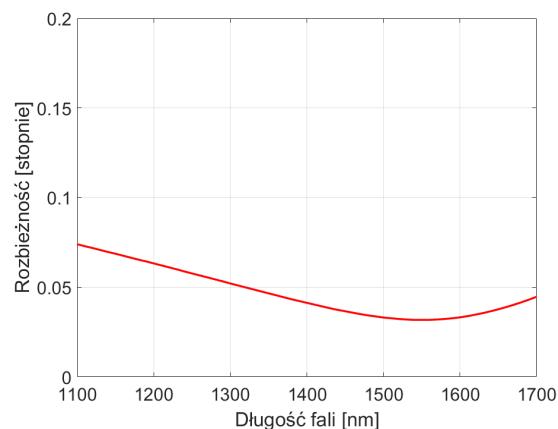


Rysunek 3.10: Zdjęcie wybranego kolimatora [12]

Na rysunku 3.11 została przedstawiona zależność szerokości wiązki od odległości od kolimatora dla wybranego elementu. Wykres ten został przedstawiony dla długości fali 1550 nm (jest to najbliższa długość do 1650nm, dla której producent udostępnia dane).



(a) Średnica wiązki - dystans od kolimatora



(b) Rozbieżność wiązki - długość fali

Rysunek 3.11: Wykresy związane z kolimatorem (na podstawie danych [12])

Podana w tabeli 3.3 rozbieżność wiązki, jest wielkością typową podaną dla długości fali 1550 nm. W rzeczywistości rozbieżność jest zależna od długości fali. Na rysunku 3.11 został przedstawiony wykres zależności rozbieżności wiązki od długości fali, gdzie możliwe jest odczytanie jej wartości dla długości 1650 nm, używanej w projekcie.

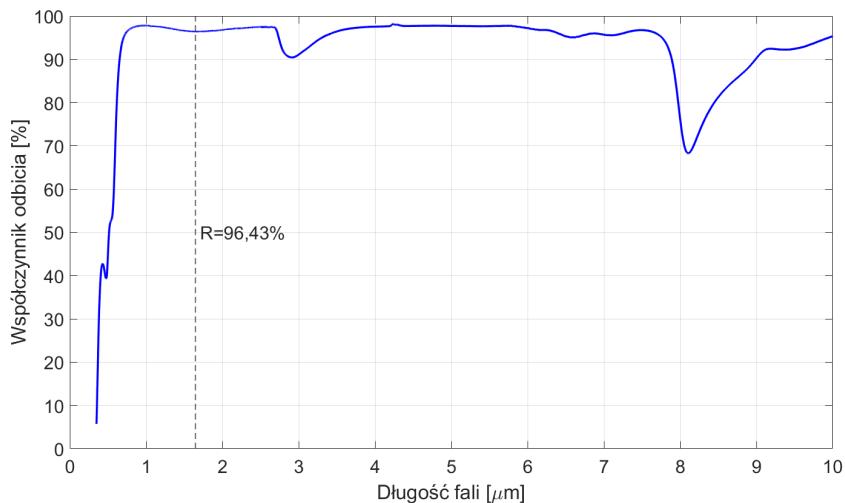
Zwierciadła

Chcąc zaprojektować odpowiednio długą drogę optyczną zachowując jednocześnie kompaktowość komory konieczne jest zastosowanie zwierciadeł mogących odbijać wiązkę. Konieczne jest zapewnienie aby użyte lustra miały odpowiednio dużą odbiciowość w wybranym zakresie podczerwieni, tak aby nie osłabiały znaczco wiązki przed dotarciem do fotodiody. Do tego celu wybrano zwierciadło ME2S-M01 z naniesioną złotą warstwą, które cechuje się wysokim współczynnikiem odbicia w zakresie podczerwieni.



Rysunek 3.12: Zdjęcie użytego zwierciadła [13]

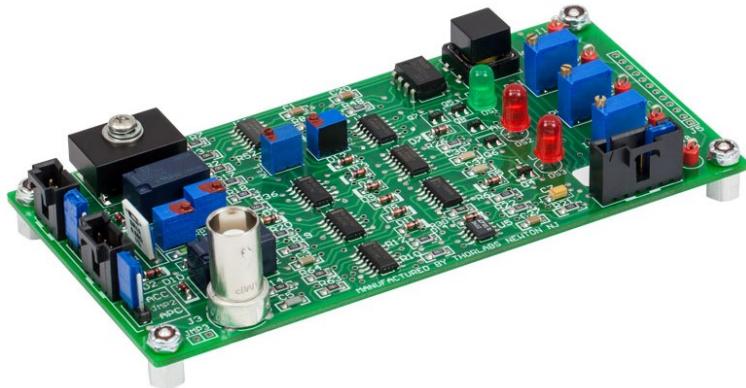
Na rysunku 3.13 został przedstawiony wykres zależności współczynnika odbicia zwierciadła od długości fali. Wykres został stworzony na podstawie danych dostarczonych przez firmę Thorlabs. Możliwe jest odczytanie z wykresu wartości współczynnika odbicia dla wartości 1650 nm, wynosi ona 96,43%.



Rysunek 3.13: Wykres zależności współczynnika odbicia od długości fali światła padającego, z zaznaczoną wartością dla długosci 1650 nm (na podstawie danych [13])

Zasilacz lasera

Do utrzymania stabilnej wiązki światła generowanego przez laser wymagane jest stałe źródło zasilania. Poza tym powinno cechować się wystarczająco dużym prądem wyjściowym, umożliwiającym pracę lasera w pełni jego możliwości. Wybrany do projektu zasilacz to IP500 - 500 mA Universal Laser Diode Driver zamówiono w sklepie Thorlabs (rysunek 3.14).



Rysunek 3.14: Zdjęcie użytego zasilacza [14]

Zasilacz ten charakteryzuje się maksymalnym prądem wyjściowym na poziomie równym 500 mA co jest wystarczające do zasilania lasera w pełnym zakresie jego możliwości. Zasilacz posiada 3 tryby sterowania prądem wyjściowym:

- Tryb ręczny stałego prądu - za pomocą potencjometru ręcznie ustawia się wartość stałego prądu wyjściowego
- Tryb ręczny stałej mocy - za pomocą potencjometru ręcznie ustawia się wartość mocy wyjściowej, która pomimo stałego prądu mogłaby się zmieniać pod wpływem zmian temperatury lasera. Zmiany mocy są kompensowane na podstawie sprzężenia zwrotnego od fotodiody skierowanej w stronę lasera, podłączonej do specjalnych do tego celu wyprowadzeń w zasilaczu
- Tryb sterowania zewnętrznym sygnałem - w tym trybie prąd wyjściowy jest sterowany poprzez sygnał wchodzący do wejścia BNC wlutowanego w układ zasilacza, prąd wyjściowy jest ustalany zgodnie z przelicznikiem 50mA/V

W celu zasilania lasera zastosowano tryb ręcznego ustawienia stałego prądu, ponieważ jest to najlepsza możliwa opcja z punktu widzenia stabilności wiązki. Dla zapewnienia stałej mocy lasera przy stałym prądle należy zapewnić stabilizację temperatury. Zasilacz posiada wyprowadzenia służące do pomiaru ustawionego limitu prądu lub mocy, aktualnego prądu lasera oraz aktualnego sygnału zwrotnego z fotodiody (niewykorzystywany).

W tabeli 3.4 zostały przedstawione parametry zastosowanego zasilacza.

Tabela 3.4: Najważniejsze parametry wybranego zasilacza [14]

Parametr	Wartość
Napięcie zasilania	± 5 VDC
Prąd zasilania	600 mA
Zakres sterowania	0 - ± 500 mA
Dokładność ustawienia	$\pm 0,5$ mA
Pomiar analogowy ustawionego limitu prądu	1V odpowiada 1A
Pomiar analogowy aktualnego prądu lasera	1V odpowiada 1A

Zasilacz jest zasilany napięciem symetrycznym +5V -5V, dlatego konieczne jest zastosowanie układu który zapewni taki rodzaj napięcia. W tym celu zastosowano przetwornice napięcia symetrycznego opartą o układ XL6007 zapewniającą takie właśnie napięcie o maksymalnym prądzie wyjściowym 800 mA, wystarczającym dla użytego zasilacza lasera.



Rysunek 3.15: Zdjęcie przetwornicy napięcia symetrycznego [15]

Wzmacniacz

Prąd generowany przez fotodiodę jest znikomo mały (kilka μ A), przez co konieczne jest jego odpowiednie wzmacnienie, tak aby sygnał był możliwy do zmierzenia. Przetworniki analogowo-cyfrowe, zwykle przetwarzają sygnał wejściowy w postaci napięcia, dlatego konieczne jest zastosowanie wzmacniacz transimpedancyjnego, którego wzmacnienie wyrażone jest w jednostce V/A. Na wejście takiego wzmacniacza podawany jest sygnał prądowy, natomiast na jego wyjściu otrzymywany jest sygnał napięciowy. Głównymi parametrami wzmacniacza są: wzmacnienie, pasmo przenoszenia oraz zakres maksymalny prądu wyjściowego i napięcia wyjściowego. Z punktu widzenia projektu najistotniejszym z nich jest odpowiednie wzmacnienie sygnału. Niestety przed przystąpieniem do testowania lasera wraz z fotodiodą nie wiadomo było jaki prąd jest generowany przez fotodiodę. Z tego powodu budowy analizatora wybrano wzmacniacz transimpedancyjny AMP102 ze sklepu Thorlabs (rysunek 3.16), z przełączalnym wzmacnieniem o wartościach 1, 10 lub 100 kV/A. Pozwoliło to na ustalenie sygnału wyjściowego do dalszej analizy o odpowiednim rzędzie wielkości, natomiast dokładniejsza wartość sygnału wyjściowego została dokonana poprzez regulację prądu zasilania lasera.



Rysunek 3.16: Zdjęcie użytego wzmacnicza transimpedancyjnego [16]

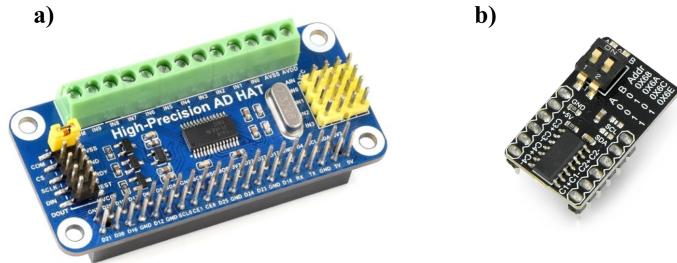
Przewody odpowiedzialne za sygnał wejściowy oraz sygnał wyjściowy podłączane są do wzmacniacza poprzez złącza BNC, co pozwala na zastosowanie odpowiednich do tego celu przewodów odpornych na zakluczenia. Urządzenie zasilane jest napięciem 5V poprzez złącze USB micro-B. Najważniejsze parametry wybranego wzmacniacza zostały zestawione w tabeli 3.5

Tabela 3.5: Parametry wybranego wzmacniacza [16]

Paramter	Minimalny	Pośredni	Maksymalny
Wzmocnienie [kV/A]	1	10	100
Maks. prąd wejściowy [μ A]	\pm 2000	\pm 200	\pm 20
Napięcie wyjściowe	od -2V do +2V		
Pasmo przenoszenia	DC - 100 kHz		
Napięcie zasilania	5 V		
Prąd zasilania	2 A		

Przetwornik ADC

W projekcie bardzo istotnym elementem jest przetwornik analogowo cyfrowy. Służy on przede wszystkim do pomiaru sygnału z fotodiody na wyjściu wzmacniacza oraz tym samym osłabień tego sygnału związanych z obecnością metanu w komorze. Kolejnym istotnym jego zastosowaniem jest pomiar temperatury lasera. Jest on kluczowy dla zapewnienia stabilności pracy i stałej mocy generowanej wiązki. Oba wymienione parametry są bardzo ważne z punktu widzenia wykonywanego pomiaru, dlatego istotne jest aby ich pomiar był jak najdokładniejszy i jak najmniej narażony na błędy. Dodatkowo w projekcie mierzone są wartości, których pomiar nie jest aż tak istotny i może być przeprowadzany z mniejszą dokładnością. Należą do nich: aktualny prąd lasera, temperatura wewnętrz obudowy oraz temperatura, wilgotność i ciśnienie wewnętrz komory. Z tego względu w projekcie użyto dwóch przetworników: dokładniejszego 32-bitowego ADS1263 (rysunek 3.17a) oraz mniej dokładnego 18-bitowego MCP3424 (rysunek 3.17a).



Rysunek 3.17: Zdjęcia użytych przetworników ADC: a) 32-bitowy ADS1263 [17], b) 18-bitowy MCP3424 [18]

Tabela 3.6: Porównanie parametrów przetworników ADS1263 i MCP3424 [17] [18]

Parametr	Przetwornik ADS1263	Przetwornik MCP3424
Rozdzielcość	32 bity	12-18 bitów
Częstotliwość próbkowania	2,5 - 38000 SPS	3,75 - 240 SPS
Weewnętrzne wzmacnianie	x1 - x8	x1 - x32
Zakres napięcia wejściowego	+2V	+2,5 V lub 0-5V
Liczba wejść	4 różnicowe	5 różnicowych lub 10 jednostronnych
Interfejs komunikacyjny	I2C	SPI

Mikrokomputer

Całe urządzenie obsługiwane jest przez jednostkę centralną, która odbiera sygnały cyfrowe od przetworników, odpowiednio je przetwarza, wykonuje niezbędne obliczenia, zapewnia interfejs graficzny dla użytkownika oraz zapisuje zebrane dane na nośnik pamięci. Do tego celu wykorzystano RaspberryPi 4b.



Rysunek 3.18: Mikrokomputer Raspberry Pi 4b wykorzystany w projekcie [19]

Urządzenie to cechuje się stosunkowo dużą pamięcią oraz mocą obliczeniową zachowując przy tym mały rozmiar. Ponadto jest zasilany napięciem 5V podobnie jak pozostałe podzespoły w budowanym analizatorze. Innymi atrybutami jakie posiada, a które są przydatne przy projekcie są:

- Możliwość zainstalowania systemu operacyjnego (Linux) oraz programowania w języku Python
- Moduł Wi-Fi - umożliwia zdalne obsługiwanie urządzenia
- 4 porty USB - umożliwiają podłączenie klawiatury, myszki oraz zewnętrznego nośnika pamięci
- Złącze microHDMI - umożliwia podłączenie wyświetlacza
- Komunikacja SPI oraz I2C - umożliwia obsługę przetworników oraz czujników
- Duża liczba portów cyfrowych

Inne elementy elektroniczne

W projekcie wykorzystano także kilka mniej istotnych elementów, które zostały wymienione poniżej i krótko opisane:

- Czujnik temperatury i wilgotności AM2320
Zakres pomiarowy temperatury: od -40 st.C do +80 st. C
Dokładność pomiaru temperatury: 0,5 st.C
Zakres pomiarowy wilgotności względnej: od 0% do 99,9% RH
Dokładność pomiaru wilgotności względnej: 3% RH
- Czujnik temperatury TMP36GT9Z
Zakres pomiarowy temperatury: od -40 st.C do +120 st. C
Dokładność pomiaru temperatury: 2 st.C
- Pompka NMP830KVDCB
- Wentylatory 12V
- Ekran dotykowy Waveshare 14628
Przekątna: 7"
Rozdzielcość: 1024x600px

Zasilanie analizatora

Większość elementów wchodzących w skład analizatora wymaga zasilania napięciem 5V, z wyjątkiem wentylatorów i pompki, które wymagają napięcia 12 V. Aby zapewnić bezpieczne zakończenie zapisu pomiarów i pracę działania programu postanowione aby zastosować zasilacz awaryjny UPS-15 15W - IPS. Za jego pomocą zasilony został mikrokomputer Raspberry wraz z podłączonymi czujnikami i przetwornikami oraz wyświetlacz. Ten rodzaj zasilacza posiada wbudowane ogniwko litowo-jonowe, które jest ładowane w czasie gdy urządzenie jest podłączone do sieci. Wtedy też urządzenie czerpie energię z sieci, gdy natomiast doszłoby do nagłego odłączenia, źródło energii jest przełączane i urządzenia mogą przez jakiś czas kontynuować pracę i ją bezpiecznie zakończyć. Pozostałe elementy takie jak zasilacz lasera, wzmacniacz, wentylatory oraz pompka zasilane są przez zasilacz Traco Power TXL 060-0534TI, który zapewnia napięcie o bardzo niskim szumie, lecz wymaga stałego zasilania z sieci.

3.3 Symulacje osłabienia wiązki

Na ostateczny sygnał wytwarzany przez fotodiodę wpływa kilka czynników, które mogą być obliczane niezależnie od siebie, takie jak:

- Związane ze stożkowym rochodeniem się wiązki
- Związane ze stratą podczas odbić na zwierciadłach

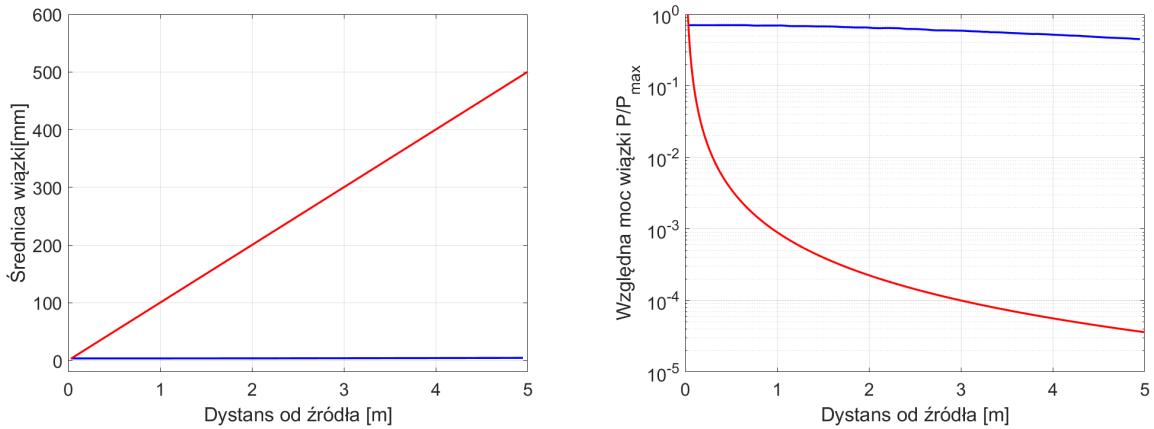
Innymi czynnikami są takie, która neleży uwzględnić w połączeniu ze sobą podczas obliczania ostatecznej siły sygnału. Należą do nich:

- Widmo świecenia lasera
- Odpowiedź spektralna fotodiody
- Widmo absorbcji metanu
- Stężenie metanu
- Długość drogi optycznej

W tej części przedstawione zostaną wyniki symulacji wykonanych w programie MATLAB, które obrazują wpływ wyżej wymienionych czynników na osłabienie wiązki i siłę sygnału.

Kąt rozwarcia wiązki

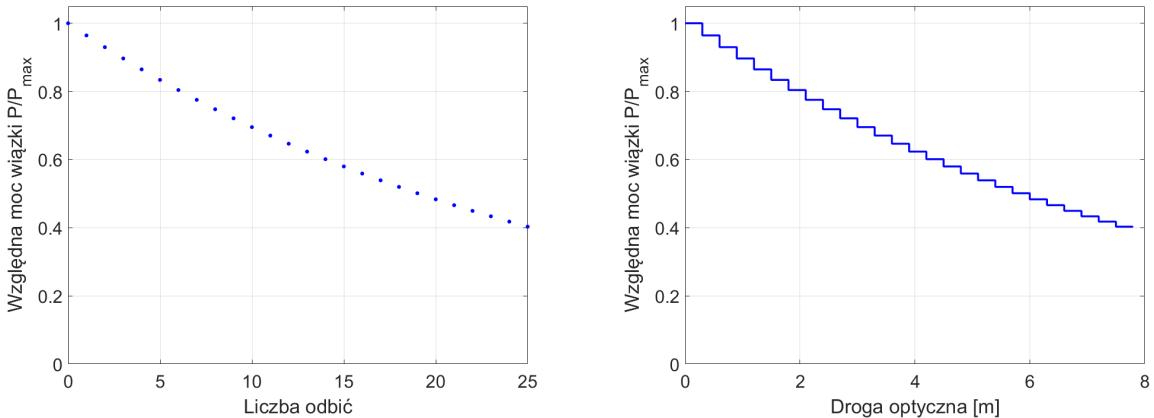
Gęstość powierzchniowa mocy lasera (ang. Pd - power density) jest odwrotnie proporcjonalna do powierzchni jej przekroju. Przy stożkowym rochodeniu się wiązki oznacza to, że gęstość mocy będzie się zmieniać wraz z odległością proporcjonalnie do czynnika $\frac{1}{R^2}$. Na rysunku 3.19 zostały przedstawione wykresy zależności wzglednego gęstości mocy promieniowania w funkcji odległości od źródła, dla wiązki skolimowanej oraz bez kolimatora. Pod uwagę został wzięty kąt rozwarcia wiązki rozmiar talii, oraz jej odległość od źródła.



Rysunek 3.19: Wykresy związane z rozbieżnością wiązki

Odbicia od zwierciadeł

Na podstawie danych dotyczących współczynnika absorpcji zwierciadeł użytych w projekcie możliwe jest stworzenie wykresu zależności natężenia światła od liczby odbić. Dodatkowo zakładając, że zwierciadła ustawione są naprzeciw siebie w odległości 30 cm, a wiązka odbija się pomiędzy nimi możliwe jest stworzenie zależności wykresu natężenia wiązki od długości drogi optycznej. Oba rodzaje wykresów zostały przedstawione na rysunku 3.20.

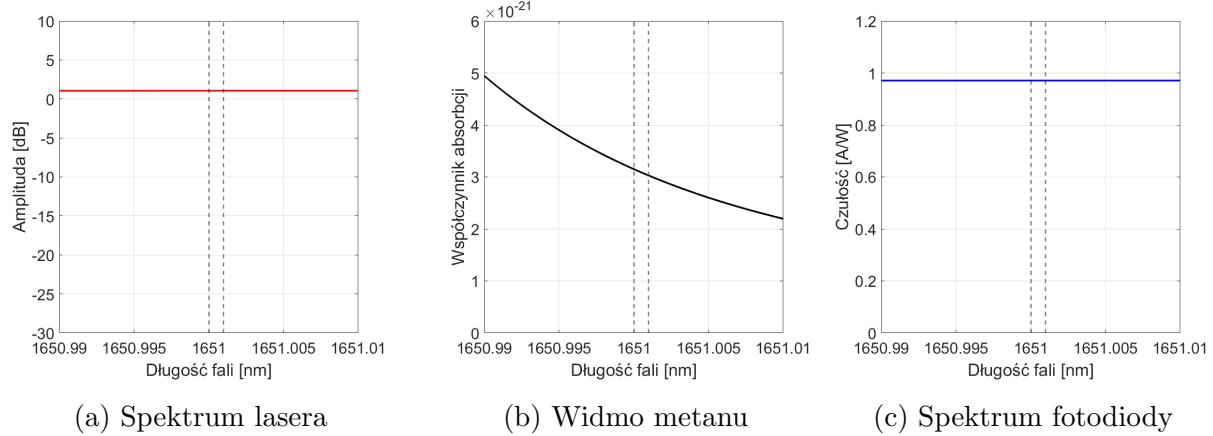


Rysunek 3.20: Wykresy związane z kolimatorem

Absorbcja przez metan

W celu wyznaczenia osłabienia wiązki promieniowania lasera wynikającego z obecności metanu dokonano podziału widma świecenia lasera na wąskie przedziały $\Delta\lambda = 0,001nm$. W obrębie takich przedziałów wartości natężenia światła lasera, współczynnika absorpcji metanu oraz wartość czułości fotodiody są w przybliżeniu stałe. Co pozwala na zasto-

sowanie prawa Lambert-Berra w postaci opisanej wzorem 2.1. Na rysunku 3.21 zostało przedstawiony opisany wycinek spektrum w okolicy długości fali 1650 nm.



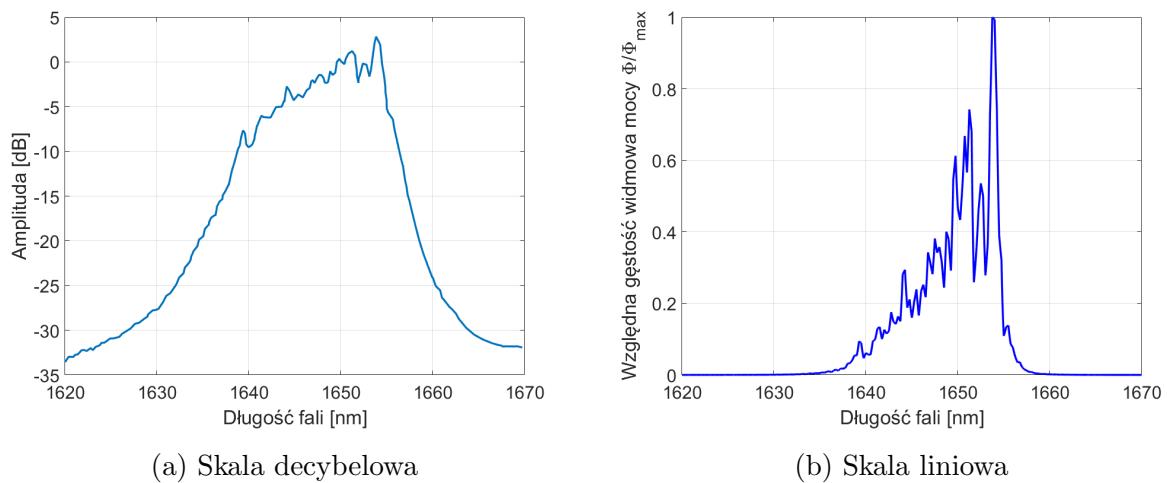
Rysunek 3.21: Wykresy przedstawiające wąski wycinek spektrum: a) lasera b) absorbcji metanu c) czułości fotodiody

Przed przystąpieniem do obliczeń konieczna była zmiana widma lasera podanego przez producentów w skali decybelowej dla amplitudy na skalę względnej gęstości widmowej mocy wiązki ($\Phi(\lambda) = \frac{dP}{d\lambda}$). Dokonano tego na podstawie poniższych wzorów:

$$K_{dB} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{A}{A_0}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{A^2}{A_0^2}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 10^{K_{dB}/10} \quad (3.6)$$

Na rysunku 3.22 zostało przedstawione porównanie wykresów widma lasera przed i po zamianie ze skali decybelowej.



Rysunek 3.22: Widmo lasera w skali: a) decybelowej b) względnej mocy wiązki

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie osłabienia na podstawie prawa Lambert-Berra dla każdego z przedziałów $\Delta\lambda$. W tym celu zostanie wykorzystany uzyskany wcześniej rozkład współczynnika absorpcji $k(\lambda)$. Aby zapewnić zgodność jednostek i poprawność obliczeń konieczne jest zastosowanie stężenia wyrażonego w jednostce [*liczba cząsteczek/cm³*] oraz długości drogi wyrażonej w [cm]. Chcąc zmienić stężenie c_p wyrażone w procentach na wymagane stężenie $c_{czast.}$, należy skorzystać z poniższego przekształcenia opartego o prawo Clapeyrona:

$$pV = nRT = \frac{N}{N_A}RT \Rightarrow \frac{N}{V} = \frac{pN_A}{RT}, \quad (3.7)$$

$$c_{czast.} = \frac{N_{CH_4}}{V} = c_p \frac{N_{all}}{V}, \quad (3.8)$$

$$c_{czast.} = c_p \frac{pN_A}{RT} \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{cm^3}, \quad (3.9)$$

gdzie:

p - ciśnienie [Pa],

V - objętość [m³],

$R \approx 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$ - stała gazowa,

T - temperatura [K],

$c_{czast.}$ - stężenie wyrażone w [*liczba cząsteczek/cm³*],

c_p - stężenie procentowe [%],

n - liczba moli gazu [mol],

$N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23}$ - stała Avogadro,

N_{CH_4} - liczba cząsteczek metanu w objętości V,

N_{all} - liczba wszystkich cząsteczek w objętości V,

$10^{-6} \frac{m^3}{cm^3}$ - czynnik zapewniający uzgodnienie jednostek.

Mając stężenie w odpowiedniej jednostce możliwe jest skorzystanie ze wzoru 3.10, gdzie natężenie światła zostaje zastąpione gęstością widmową mocy wiązki w celu osłabienia przez metan w danej długości fali spektrum:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) e^{-k(\lambda) \cdot l \cdot c_{czast.}}, \quad (3.10)$$

gdzie:

$\Phi(\lambda)$ - gęstość mocy osłabionej wiązki w długości fali λ ,

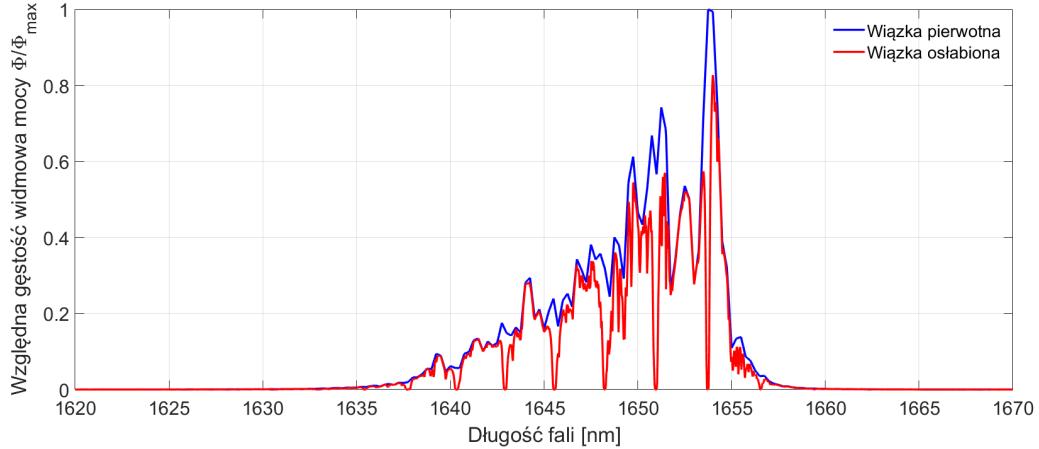
$\Phi_0(\lambda)$ - gęstość mocy początkowej wiązki w długości fali λ ,

$k(\lambda)$ - wartość całkowitego współczynnika absorbcji w długości fali λ [1/(cząsteczka·cz⁻²)],

l - długość drogi optycznej [cm],

$c_{czast.}$ - stężenie metanu [*liczba cząsteczek/cm³*].

Na rysunku 3.23 przedstawiono na wspólnym wykresie dwie krzywe: spektrum wiązki lasera przed osłabieniem i po osłabieniu. Obliczenia przeprowadzono dla przykładowych danych $l = 10000\text{cm}$ oraz $c_{czast.} = 10\%$.



Rysunek 3.23: Wykres przedstawiający spektrum wiązki lasera; krzywa niebieska - oryginalne; krzywa czerwona - osłabione przez metan

Na wykresie osłabienia wiązki widoczne są wyraźne wycięcia w miejscach występowania pików absorpcji. Na podstawie tak wyznaczonego osłabionego spektrum możliwe jest wyznaczenie względnego osłabienia wiązki zgodnie ze wzorem 3.11

$$\beta = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - \frac{\int \Phi(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_0(\lambda) d\lambda} \quad (3.11)$$

$$\beta = 25, 40\%$$

Ostatnim etapem przed dotarciem sygnału do układu rejestrującego, a który należy uwzględnić obliczając osłabienie związane z obecnością metanu jest odpowiedź spektralna fotodiody. Ostateczny stopień osłabienia sygnału zależy od tego w jakim stopniu dioda jest czuła w obszarach spektrum gdzie dochodzi do absorpcji przez metan, a w jakim stopniu jest czuła w innych obszarach spektrum. W tym celu należy pomnożyć spektrum wiązki docierającej do fotodiody przez czynnik $R(\lambda)/R_{max}$ będący unormowaną odpowiedzią spektralną fotodiody. Zgodnie ze wzorem 3.13

$$\Phi'(\lambda) = \Phi(\lambda) \cdot \frac{R(\lambda)}{R_{max}} \quad (3.12)$$

gdzie:

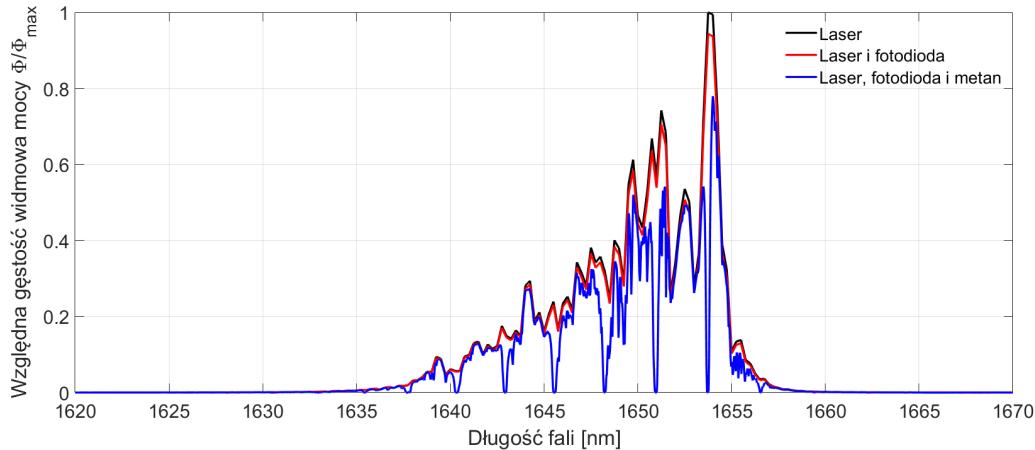
$\Phi(\lambda)$ - gęstość widmowa mocy lasera osłabiona obecnością metanu ,

$\Phi'(\lambda)$ - gęstość widmowa mocy po uwzględnieniu spektrum fotodiody,

$R(\lambda)$ - odpowiedź spektralna fotodiody dla długości fali λ

R_{max} - maksymalna odpowiedź spektralna fotodiody w rozważanym zakresie długości fal

Na rysunku 3.24 przedstawiono na wspólnym wykresie 3 krzywe: widmo lasera przed uwzględnieniem spektrum fotodiody, po jego uwzględnieniu oraz po dodatkowym osłabieniu przez metan (w warunkach jak przy wykresie 3.23).



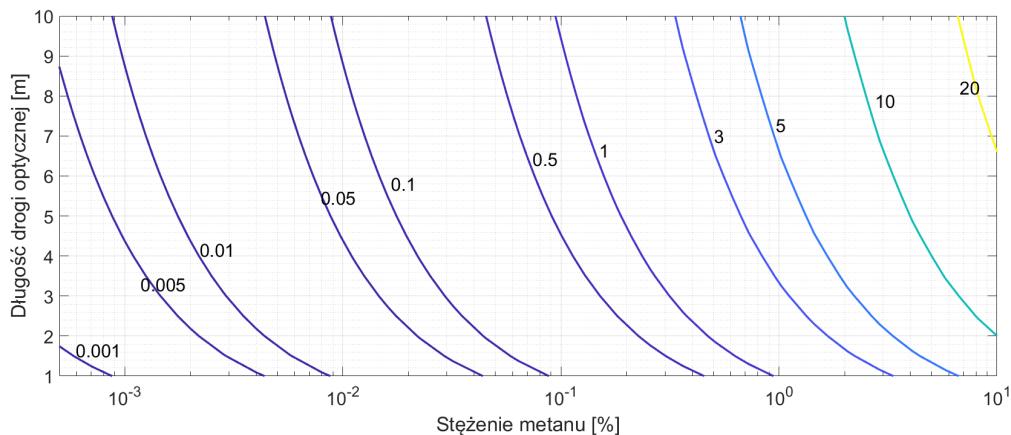
Rysunek 3.24: Wykres przedstawiający widmo z uwzględnieniem różnych etapów

Podobnie jak wcześniej możliwe jest wyznaczenie całkowitego osłabienia wiązki przez metan z uwzględnieniem zarówno spektrum lasera jak i fotodiody zgodnie ze wzorem 3.13

$$\beta' = 1 - \frac{\Phi'}{\Phi'_0} = 1 - \frac{\int \Phi'(\lambda) d\lambda}{\int \Phi'_0(\lambda) d\lambda} \quad (3.13)$$

$$\beta = 25, 38\%$$

Właśnie ten sygnał i jego osłabienie będą analizowane przez dalszą część układu. Dla lepszego zorientowania się w skali osłabienia wiązki na rysunku 3.25 przedstawiono zależność względnego osłabienia od stężenia metanu, dla różnych długości drogi optycznej.



Rysunek 3.25: Wykres przedstawiający zależność osłabienia [%] od stężenia oraz długości drogi optycznej

3.4 Symulacje przepływu oraz mieszania

Innym ważnym z punktu widzenia analizatora parametrem fizycznym układu jest tak zwany czas wymiany (inaczej średni czas przebywania). Jest to średni czas jaki dana porcja gazu przebywa wewnątrz komory. Zdefiniowany jest on wzorem 3.14 [20].

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3.14)$$

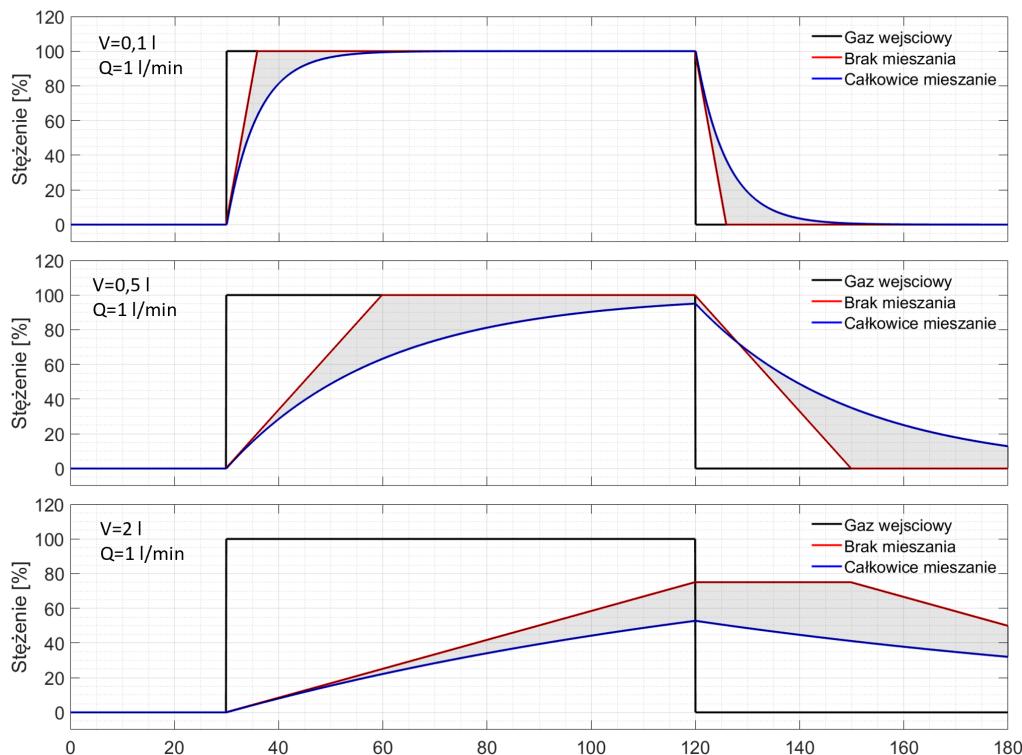
gdzie:

τ - czas wymiany [s]

V - objętość zbiornika [m^3]

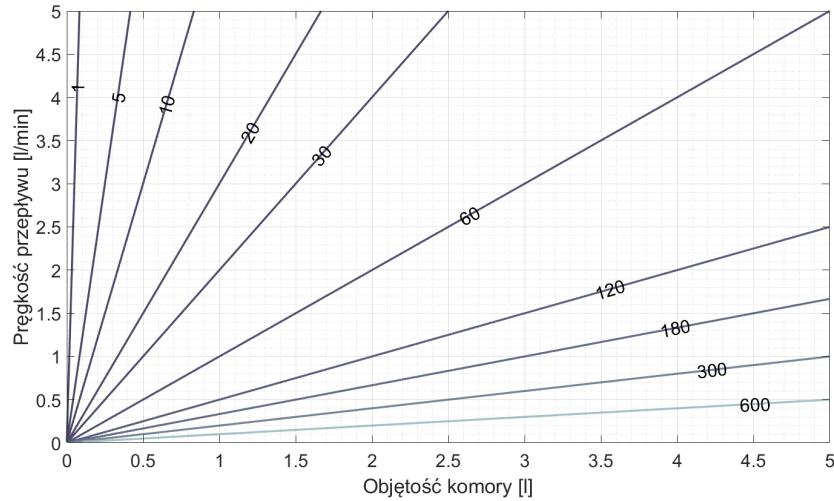
Q - prędkość przepływu [m^3/s]

Dla projektu korzystne jest aby czas ten był jak najmniejszy. Ponieważ wraz z jego wzrostem zwiększa się opóźnienie rejestracji zmiany stężenia, gdy ta pojawi się na wlocie komory, ponadto odczytywany wynik nie jest aktualnym stężeniem gazu który dostaje się do komory lecz średnią z pewnego okresu z przeszłości. W celu zbadania zależności tego parametru od objętości komory oraz prędkości przepływu przeprowadzono odpowiednie symulacje w programie MATLAB, a uzyskane wyniki zostały zaprezentowane na wykresach.



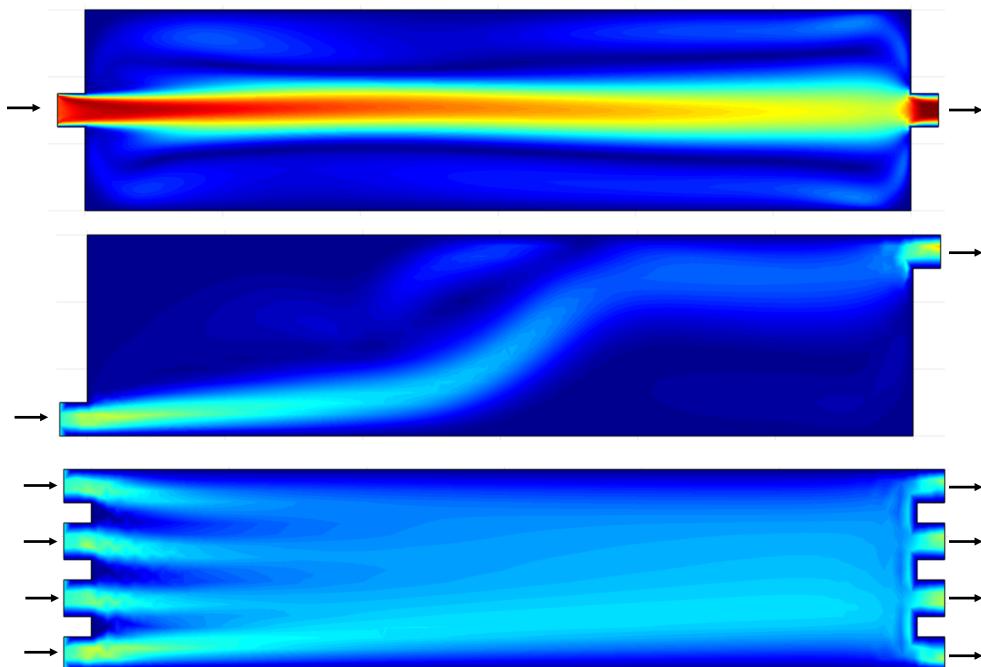
Rysunek 3.26: Wykresy przedstawiające wymianę gazu różnych rozmiarów komory i prędkości przepływu

Najlepsze rezultaty jeśli chodzi o podobieństwo pomiędzy średnim stężeniem w komorze a stężeniem gazu wlotowego w skali czasu uzyskiwane są dla małych objętości komory i dużych przepływów. Na każdym z wykresów została napisana wartość odpowiadająca dla niego czasu przepływu. Na rysunku 3.27 przedstawiono zależności tego parametru od V i Q .



Rysunek 3.27: Wykres przedstawiający zależność czasu wymiany [s] gazu od objętości komory i prędkości przepływu

Innym ważnym czynnikiem poza czasem wymiany związanym z przepływem gazu w komorze jest jego sposób przepływu i stopień mieszania się. Komora wraz z wlotami powinna być tak skonstruowana aby gaz, który wlatuje do komory był rozprowadzany równomierne po całej jej objętości. Istotne jest aby w komorze nie występowały tak zwane "martwe obszary" gdzie gaz jest praktycznie nieruchomy a stały strumień przepływa przez wąski fragment komory. W tym celu zaprojektowano kilka przykładowych rozwiązań i zasymulowano przepływ gazu wewnątrz komory przy pomocy rozszerzenia do programu MATLAB - CFD Tool. Wyniki symulacji zostały zobrazowane na rysunku 3.28. Skala kolorów odnosi się do prędkości przepływu w danym punkcie. Wykresy przedstawiają pojedyńczą chwilę czasową, a nie stan ustalony.



Rysunek 3.28: Wykresy przedstawiające symulacje przepływu dla różnych rozwiązań dotyczących umiejscowienia wlotu i wylotu w komorze

3.5 Geometria komory i drogi optycznej

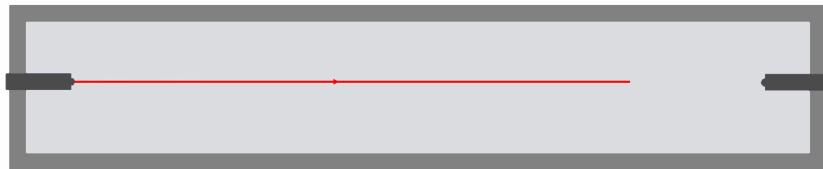
Podsumowując powyższe rozważania można wymienić kilka cech jakie powinna mieć komora pomiarowa oraz droga optyczne wewnętrznej niej:

- Długa droga optyczna - tak aby osłabienie spowodowane przez metan było jak najbardziej dostrzegalne
- Mały rozmiar - tak aby czas wymiany dla komory był jak najmniejszy, żeby mierzone stężenie jak najlepiej odzwierciedlało stężenie gazu wlatującego do komory
- Geometria, zapewniająca równomierny przepływ i dobre mieszanie
- Stabilność - tak by drgania urządzenia nie wpływały na rozchodzenie się wiązki

Poniżej przedstawiono kolejne pomysły geometrii drogi optycznej wraz z ich ilustracją oraz krótkim opisaniem zalet i wad:

1. Wiązka skolimowana bez zwierciadeł

Laser i fotodioda są ustawione naprzeciwko siebie, w taki sposób, że wiązka lasera wpada bezpośrednio w obszar fotoczuły fotodiody.



Rysunek 3.29: Schemat przestawiający geometrię komory dla wiązki skolimowanej bez zwierciadeł

Zalety:

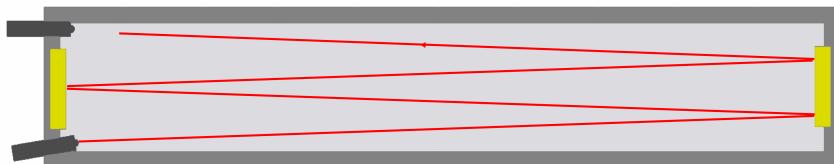
- łatwa w ustawieniu konfiguracja
- stabilna wiązka

Wady:

- bardzo krótka dorga optyczna

2. Wiązka skolimowana z dwoma zwierciadłami

Wiązka odbija się kilku lub kilkunastokrotnie od zwierciadeł ustanowionych naprzeciwko siebie, po czym pada na fotodiodę.



Rysunek 3.30: Schemat przestawiający geometrię komory dla wiązki skolimowanej z dwoma zwierciadłami

Zalety:

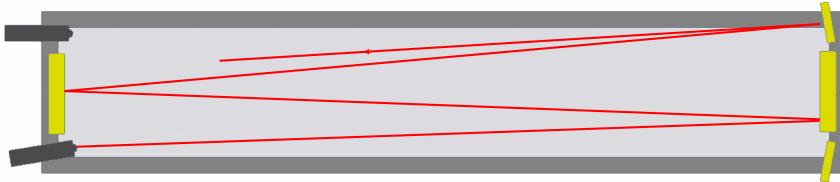
- długa droga optyczna (kilka metrów)

Wady:

- trudniejsza w ustawieniu konfiguracja
- wiązka wrażliwa na drgania

3. Wiązka skolimowana z dwoma zwierciadłami głównymi i dwoma dodatkowymi

Wiązka podobnie jak w poprzedniej konfiguracji wykonuje serię odbić między dwoma głównymi zwierciadłami, po czym trafia na małe zwierciadło i ponownie wykonuje serię odbić. Całość jest powtórzona jeszcze raz i dopiero wiązka trafia do fotodiody.



Rysunek 3.31: Schemat przestawiający geometrię komory dla wiązki skolimowanej z dwoma zwierciadłami głównymi i dwoma dodatkowymi

Zalety:

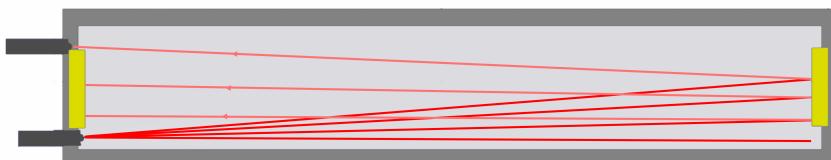
- dłuża droga optyczna (kilkanaście metrów lub więcej)

Wady:

- bardzo trudna w ustawieniu konfiguracja
- wiązka bardzo wrażliwa na najmniejsze drgania układu

4. Wiązka nieskolidowana z dwoma zwierciadłami

Wiązka jest nie skolimowana, tworząc pakiet wiązek rozchodzących się pod różnymi kątami. Część z nich pada na ścianki komory gdzie jest absorbowana, część natomiast pada na przeciwległe zwierciadło i zaczyna się odbijać pomiędzy zwierciadłami jak w przypadku rozwiązania 2. Różne części wiązki odbijają się różną liczbą razy pomiędzy zwierciadłami po czym trafiają do fotodiody. W efekcie zamiast konkretnej długości drogi optycznej uzyskiwana jest średnia droga optyczna. W celu zapewnienia jej jak największej wartości możliwe jest zastosowanie takiego ustawienia lasera i fotodiody aby, do celu docierały tylko jak najbardziej równolegle fragmenty wiązki, które wielokrotnie obijają się między zwierciadłami.



Rysunek 3.32: Schemat przestawiający geometrię komory dla wiązki nieskolidowanej z dwoma zwierciadłami

Zalety:

- łatwość ustawienia
- mała wrażliwość na drgania
- stosunkowo duża średnia długość optyczna

Wady:

- brak znajomości dokładnej drogi optycznej i jej długości
- straty większości mocy wiązki na ściankach komory

W celu wyboru optymalnej opcji dla projektu zostały przeprowadzone testy różnych rozwiązań.

4 Implementacja fizyczna

Celem tego rozdziału jest szczegółowe przedstawienie procesu podłączania wybranych elementów oraz implementacji rozważań przedstawionych we wcześniejszej części pracy. Przedstawione zostaną kolejne etapy działań, zgodnie z ich chronologicznym przebiegiem.

4.1 Przetwornik ADC i dokładność pomiaru

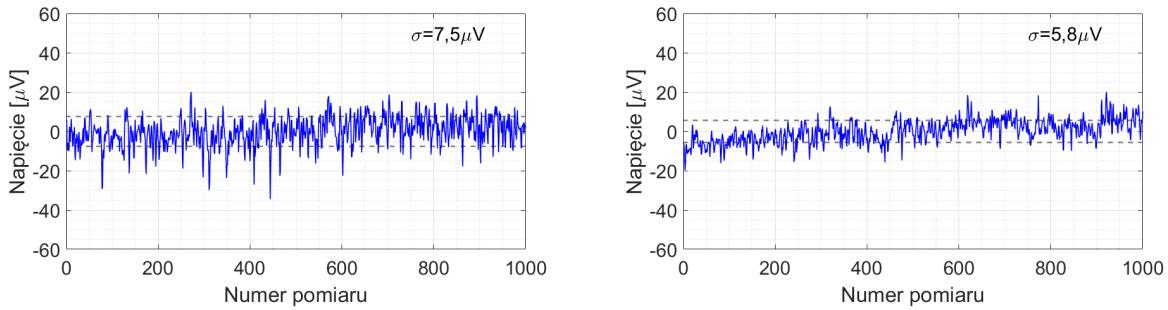
Pierwszym z elementów jaki poddano testom był 32-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, który został użyty do pomiaru sygnału z fotodiody. W tym celu podłączono go do wybranego mikrokomputera. Przetwornik został skonstruowany w formie nakładki rosszerzającej na RaspberryPi co stanowiło znaczne ułatwienie przy pierwszym połączeniu. Do przeprowadzenia testów wykorzystano źródło napięcia odniesienia ICL8069 o napięciu 1.235 V, tak aby mieć pewność, że mierzone zmiany wynikają z pracy przetwornika, a nie z niestabilności źródła. Moduł komunikuje się przez interfejs SPI. W celu jego obsługi i odczytu pomiarów stworzono prosty program w języku Python. Przetwornik ma możliwość ustawienia z poziomu oprogramowania kilku parametrów pracy takich jak:

- wejście sygnału – jednostronne lub różnicowe,
- napięcie odniesienia – do wyboru: napięcie zasilania, wewnętrzne źródło referencyjne, zewnętrzne źródło referencyjne,
- częstotliwość próbkowania,
- wewnętrzne wzmacnienie sygnału,

Spośród wymienionych, na wstępie jako napięcie odniesienia wybrano wewnętrzne źródło referencyjne oraz wewnętrzne wzmacnienie sygnału ustawiono na równe 1. Natomiast parametry związane z częstotliwością pomiaru oraz rodzaju podłączenia sygnału wejściowego zostały porównane przez wykonanie pomiarów. Ich wyniki zostały przedstawione poniżej.

Rodzaj sygnału wejściowego

Istnieją dwa podstawowe sposoby pomiaru sygnałów za pomocą ADC – pomiar jednostronny i pomiar różnicowy. Pierwszy z nich to bezpośredni pomiar pojedynczego sygnału. Masa układu przetwornika i układu generującego sygnał są ze sobą połączone, przez co wykorzystywane jest tylko jedno wejście analogowe. Ten rodzaj pomiaru jest prostszy, ale może być bardziej podatny na zakłócenia wspólne co wiąże się z niższą dokładnością. Pomiar różnicowy polega na porównywaniu dwóch różnych sygnałów wejściowych. Ujemny i dodatni biegun sygnału podłączone są do dwóch wejść analogowych i mierzona jest różnica między nimi. Ten rodzaj podłączenia eliminuje zakłócenia wspólne (np. związane z indukcją w przewodach), co powinno przełożyć się na wyższą dokładność. Na rysunku 4.1 przedstawiono porównanie pomiaru dwoma sposobami. Zostało wykonanych 1000 pomiarów z częstotliwością 10 SPS.

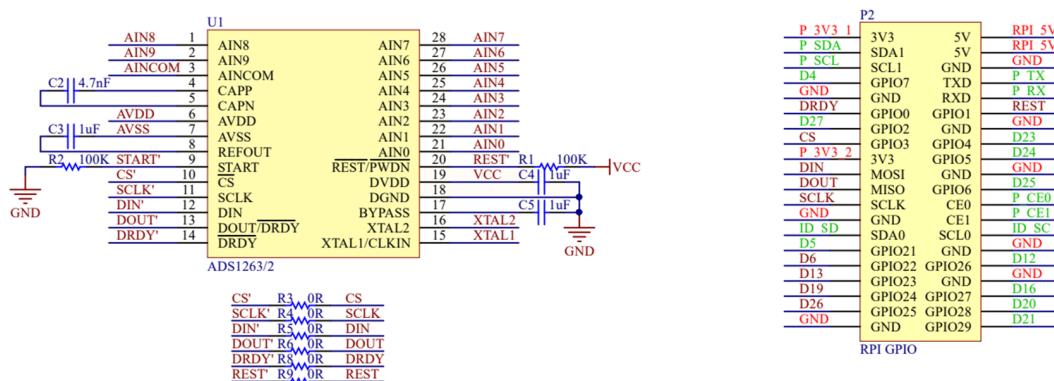


Rysunek 4.1: Wykresy przedstawiający pomiar trybem jednostronnym i różnicowym

Od każdej z serii pomiarów została odjęta średnia, tak aby na wykresie widoczne były tylko wartości szumów sygnału. Dodatkowo przerywaną linią zostały zaznaczone poziomy odchylenia standardowego dla danych serii pomiarów. Widoczne jest, że sygnał różnicowy daje lepsze pod względem szumów rezultaty i dalsze pomiary zostały wykonywane tym sposobem podłączenia sygnału.

Dryf temperaturowy ADC

Wykonując dłuższe serie pomiarów zaobserwowano dryf mierzonej wartości napięcia. Sugerowało to wpływ temperatury przetwornika na pomiar. Podczas pracy sam przetwornik nie generował znacznych ilości ciepła, jednak RaspberryPi, do którego był podłączony już tak. W celu eliminacji tego zakłócenia postanowiono na odseparowanie tych dwóch urządzeń od siebie i połączenie wymaganych wyprowadzeń zgodnie ze schematem zapewnionym w dokumentacji przetwornika (rysunek 4.2).

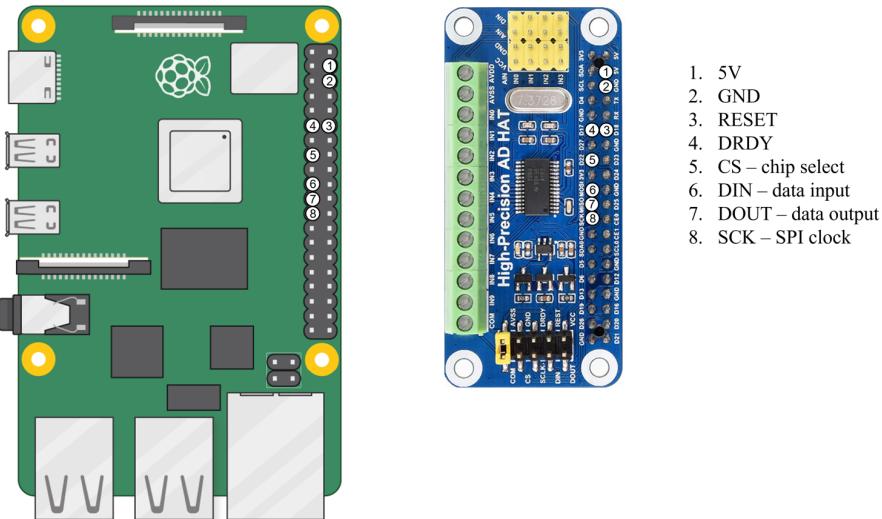


Układ scalony ADS1263/2

Interfejs Raspberry

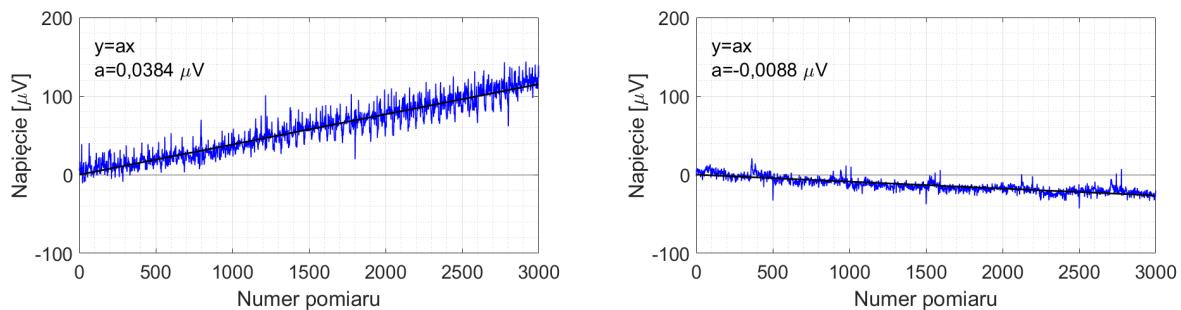
Rysunek 4.2: Fragment dokumentacji przetwornika, przedstawiający połączenie jego układu scalonego z interfejsem RaspberryPi [21]

Wymagane połączenia piny zostały zaznaczone wraz z ich opisem na schemacie RaspberryPi oraz przetwornika (rysunek 4.3).



Rysunek 4.3: Schemat RaspberryPi oraz przetwornika ADC z zaznaczonymi wyprowadzeniami wymagającymi połączenia (opracowanie własne na podstawie [19] [17])

Po odseparowaniu układów, wykonano pomiary w celu porównania obydwu rozwiązań. Wykonano serie 3 000 pomiarów z częstotliwością próbkowania 10 SPS. Wyniki zostały przedstawione na wykresach 4.4.

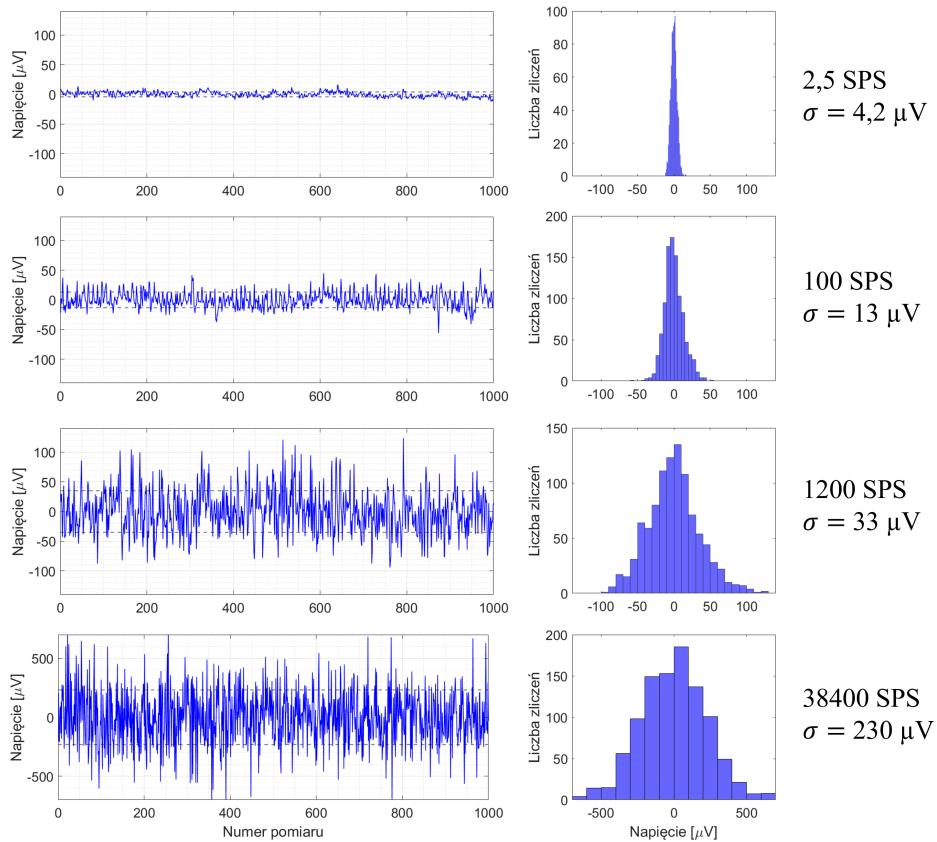


Rysunek 4.4: Wykresy przedstawiający pomiar przed i po odseparowaniu przetwornika od RaspberryPi

Do otrzymanych danych zostały dopasowane krzywe regresji liniowej oraz wyniki zostały tak przesunięte wzduł osi y aby wyraz wolny b dopasowanej prostej się zerował. Przed odseparowaniem przetwornika od Raspberry, jego wskazania wyraźnie rosły z upływem czasu i wzrostem temperatury przetwornika. Po odseparowaniu efekt ustaje, widoczne jest także znaczne zmniejszenie poziomu szumu który może być również zależny od temperatury pracy, bądź jest spowodowany bliskim kontaktem układu z innym urządzeniem elektronicznym. Widoczny jest nieznaczny malejący dryf, który najprawdopodobniej jest zmianami temperatury źródła referencyjnego.

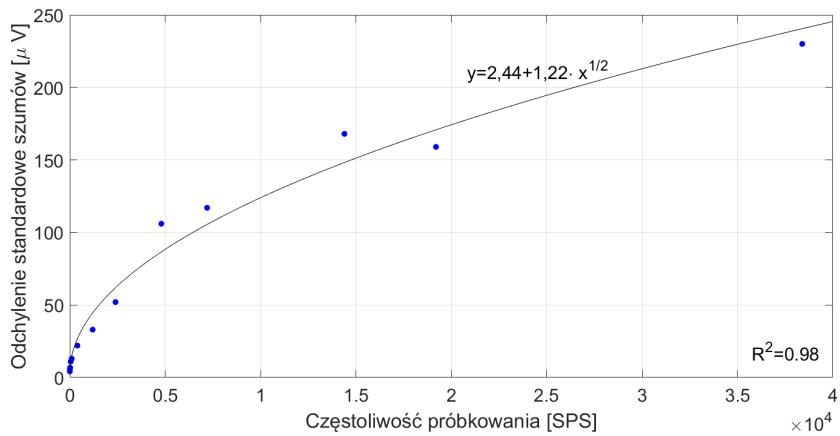
Częstotliwość próbkowania a szumy

Bardzo istotnym z punktu widzenia pomiaru parametrem jest częstotliwość próbkowania. Chcąc otrzymywać jak najbardziej aktualne informacje o sygnale, należałoby wykonywać pomiary jak najczęściej. Niestety działanie takie wiąże się ze wzrostem szumów mierzonego sygnału. Przeprowadzono porównanie wyników pomiarów przy różnych częstotliwościach próbkowania. W każdym przypadku wykonano 1000 pomiarów oraz obliczono odchylenie standardowe i zaznaczono je na wykresie. Dodatkowo dla każdej serii pomiarów wykonano histogram w którym zawarte były odchylenia pomiarów od średniej serii (histogram przesunięty, tak aby średnia znajdowała się w 0).



Rysunek 4.5: Wykresy przedstawiające wielkość szumów dla różnych częstotliwości próbkowania ADC. Dla częstotliwości 38400 SPS została rozszerzona skala napięć

Widoczna jest wyraźna zależność wielkości szumów od częstotliwości próbkowania. Im większa częstotliwość próbkowania tym większa wartość odchylenia standarodowego mierzonego sygnału. Na rysunku 4.6 przedstawiona została zależność odchylenia standarodowego szumów mierzonego sygnału od częstotliwości pomiarów.



Rysunek 4.6: Wykresy przedstawiające zależność odchylenia standardowego od częstotliwości próbkowania ADC

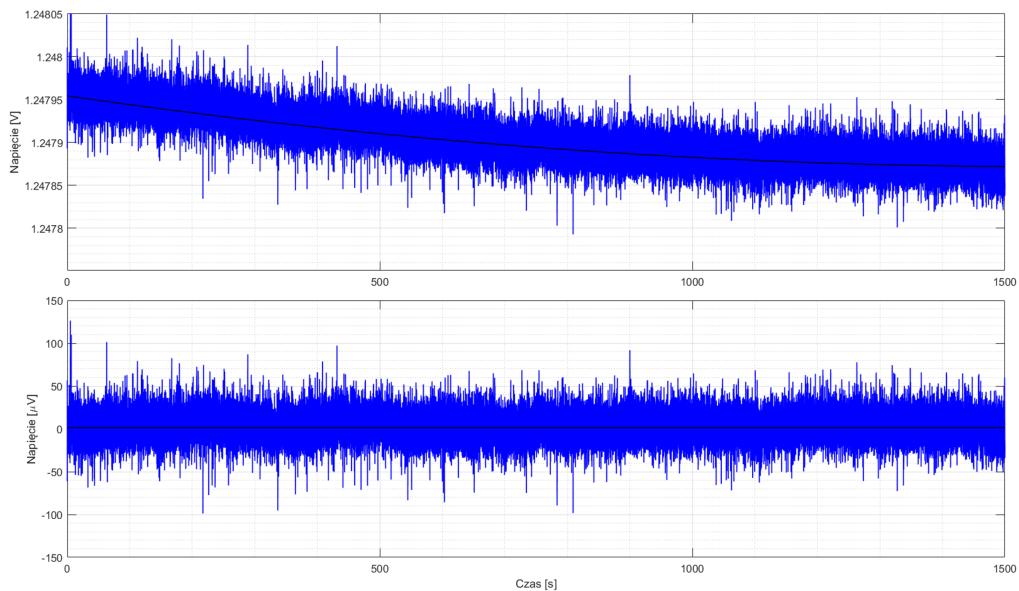
Do zmierzonych punktów dopasowano krzywą pierwiastkową. Współczynnik $R^2 = 0,98$ świadczy o dużej zgodności tego dopasowania. Zależność tę należy uwzględnić przy projektowaniu analizy sygnału fotodiody.

Sposób przeprowadzenia i przetworzenia pomiarów

Chcąc uzyskać jak najdokładniejszy pomiar sygnału oraz jego osłabienia, należy uwzględnić wyżej wymienione czynniki. Biorąc pod uwagę fakt, że czas wymiany gazu jest niezerowy, a jego wartość jest obliczana zgodnie ze wzorem 3.14, nie jest wymagane, żeby pomiar był wykonywany jak najczęściej. Wystarczający będzie pomiar wykonywany z odstępami czasu porównywalnymi do czasu wymiany komory. Pozwala to na zastosowanie różnych rozwiązań zapewniających większą dokładność pomiaru. W tej części zostaną porównane następujące zaproponowane metody:

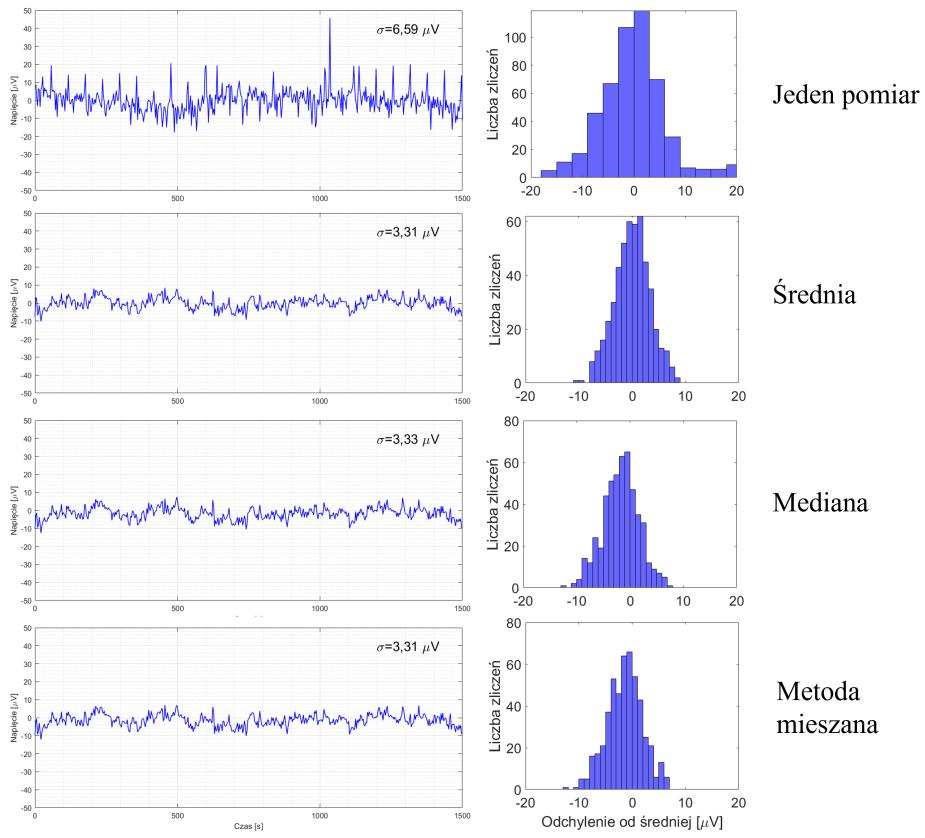
- wykonanie pojedyńczego pomiaru raz na okres z ustawioną najmniejszą możliwą częstotliwością próbkowania ADC (2,5 SPS);
- wykonanie takiej liczby pomiarów jaka jest możliwa w jednym okresie i obliczenie z nich średniej;
- wykonanie takiej liczby pomiarów jaka jest możliwa w jednym okresie i obliczenie z nich mediany;
- wykonanie takiej liczby pomiarów jaka jest możliwa w jednym okresie, odrzucenie wartości poniżej dolnego i powyżej górnego kwartyla, a następnie obliczenie średniej z pozostałych pomiarów.

Podczas porównania założono, że wynik powinien być uzyskiwany raz na 3 sekundy. Wykonano dwie serie pomiarów – pierwsza to 500 pomiarów raz na 3 sekundy z ustawioną częstotliwością próbkowania 2,5 SPS zgodnie z metodą pojedyńczego pomiaru, druga to ciąg pomiarów bez przerwy z częstotliwością 100 SPS przez równoważny okres czasu 1500 s – łącznie 150 tys. pojedyńczych pomiarów. Po wykonaniu pomiaru zaobserwowano malejący dryf mierzonego sygnału (przeciwny do mierzonego dryfu przetwornika ADC). Dryf ten miał swoje pochodzenie w źródle referencyjnym, które znajdowało się w pobliżu Raspberry i przez to wzrastała jego temperatura i poziom napięcia. W celu eliminacji wpływu tego efektu, do obu serii pomiarów dopasowano krzwą wielomianową drugiego stopnia i odjęto ją od całej serii. Proces został przedstawiony na rysunku 4.7. Efekt ten należy mieć na uwadze podczas rozmieszczania elementów w obudowie, w celu jak największej stabilności układu ważna jest stabilność jego temperatury.



Rysunek 4.7: Wykresy przedstawiające wyeliminowanie efektu dryfu z serii danych

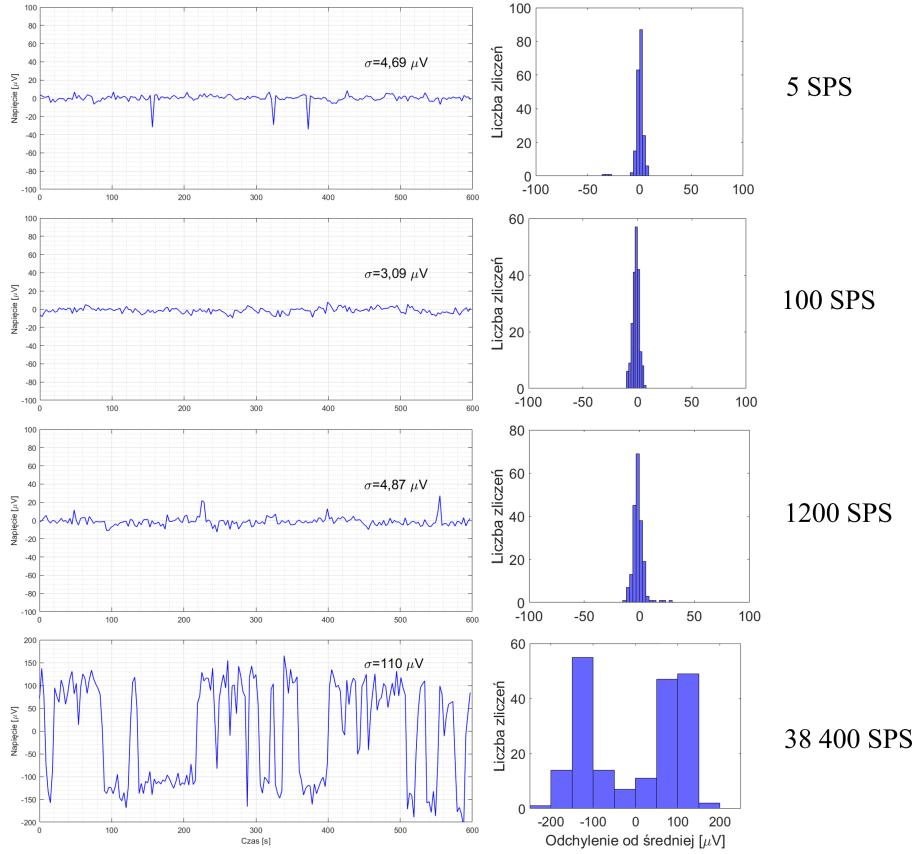
Po wstępny przygotowaniu danych dużą serię pomiarów podzielono na części po 300 pomiarów każda i przetworzno zgodnie z wcześniejszym opisem. Wszystkie 4 sposoby zostały przedstawione na wykresach na rysunku 4.8 wraz z wartością odchylenia standar-dowego oraz histogramami odchylenia od średniej.



Rysunek 4.8: Wykresy prorównujące szumy w zależności od sposobu wykonywania pomiarów

Widoczne jest, że dla pojedyńczych pomiarów odchylenie standardowe jest około 2 razy większe niż dla przetworzonej serii. Dla wszystkich metod obróbki danych odchylenie standardowe jest bardzo zbliżone. Najmniejsze wartości odchylenia uzyskane są dla średniej oraz metody mieszanej. W celu eliminacji potencjalnych przypadkowych dużych odstępstw pomiarowych zdecydowano o zastosowaniu metody mieszanej odcinającej od serii skrajne wyniki.

W kolejnym kroku dokonano porównania wybranej metody dla różnych częstotliwości próbkowania. Wyniki porównania zostały przedstawione na rysunku 4.9. Niestety dla większych częstotliwości próbkowania ograniczającym prędkość czynnikiem była szybkość zapisu danych na Raspberry, przez co rzeczywista liczba pomiarów w danym okresie była mniejsza niż zakładana. Przełożyło się to na podwyższony poziom szumów dla częstotliwości 1200 SPS oraz 38400 SPS, dla której wynik znacznie odbiega od pozostałych. Najmniejsza wartość odchylenia standardowego przypadła dla wartości 100 SPS, prawdopodobnie przez możliwość odrzucenia większej liczby skrajnych wyników niż w przypadku małej liczby pomiarów dla 5 SPS. Jednocześnie dla tej częstotliwości nie występował jeszcze efekt ograniczenia przez prędkość zapisu.



Rysunek 4.9: Wykresy porównujące szумy w zależności od częstotliwości próbkowania przy wybranej metodzie przetwarzania danych

Ostatecznie do przeprowadzania pomiarów zastosowano metodę odrzucenia skrajnych wyników (poza 1 i 3 kwartylem) i uśrednienia pozostałą połowę. Pomiary przeprowadzane są z częstotliwością 100 SPS i następnie przetwarzane. Na końcu, aby zniwelować efekt szumów przetwornika, o odchyleniu standardowym $\sigma_{ADC} = 3,1\mu V$ w rejertowanym sygnale z fotodiody, wynik zostaje zaokrąglony. Wszystkie wartości w przedziale $(x_i - \sigma_{ADC}, x_i + \sigma_{ADC})$ zaokrąglane są do wartości x_i . W ten sposób odległość pomiędzy możliwymi mierzonymi wartościami sygnału wynosi $6 \cdot \sigma_{ADC} = 18,6\mu V \approx 20\mu V$.

4.2 Laser i fotodioda - podłączenie elementów

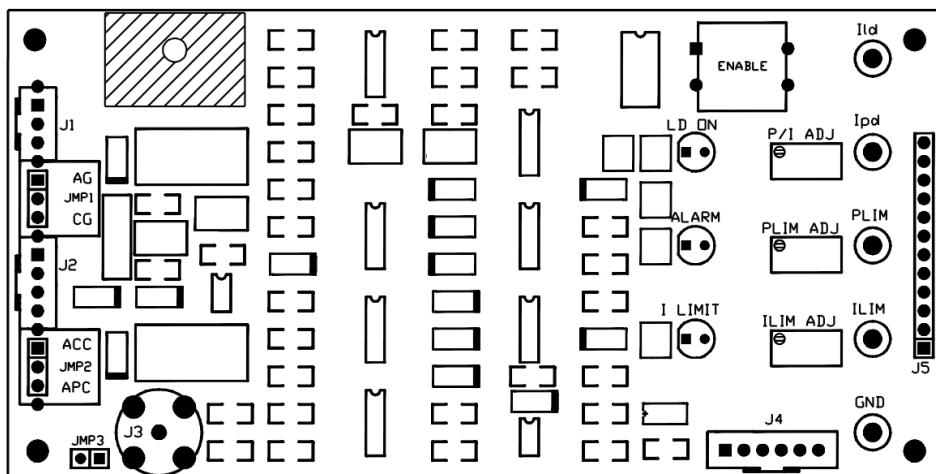
Po ustaleniu sposobu wykonywania pomiaru przez przetwornik ADC, przystąpiono do podłączenia pozostałych elementów odpowiedzialnych za pracę układu.

Fotodioda i wzmacniacz

Pierwszym krokiem było podłączenie fotodiody do wzmacniacza i zasilenie go. Początkowo ustawiono wartość wzmacnienia na najmniejszą i ustawiono przełącznik AG(CG) (anode grounded/ cathode grounded) na AG (w tym projekcie nie ma to większego znaczenia, mówi to o tym który koniec diody jest połączony z masą). Układ testowano przy pomocy tymczasowego źródła podczerwieni jakim była lampa żarowa. Mierząc sygnał na wyjściu wzmacniacza po skierowaniu fotodiody w kierunku lampki, widoczny był wzrost napięcia, co świadczy o prawidłowej pracy fotodiody oraz wzmacniacza. Przy wyłączonym źródle podczerwieni napięcie na wyjściu wzmacniacza wynosi 0V, co oznacza, że promieniowanie w zakresie czułości fotodiody występujące w otoczeniu jest znikomo małe.

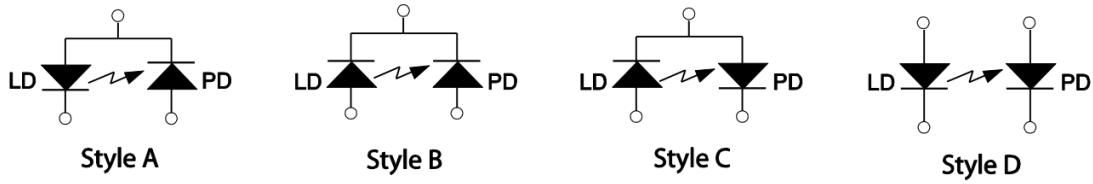
Laser i zasilacz

Kolejnym krokiem było połączenie lasera do zasilacza i uruchomienie go. Na rysunku 4.10 zostało przedstawiony schemat układu zasilacza wraz z opisanymi najważniejszymi dla użytkownika elementami.



Rysunek 4.10: Schemat układu zasilacza - widok z góry (opracowanie własne na podstawie [14])

W pierwszej kolejności do złącza J1 z trzema przewodami (czarny, czerwony i żółty) podłączono wyprowadzenia przetwornika napięcia symetrycznego, służące do zasilenia układu. Kolejnym krokiem był wybór stylu podłączenia lasera i fotodiody, spośród tych przedstawionych przez producenta w instrukcji 4.11.

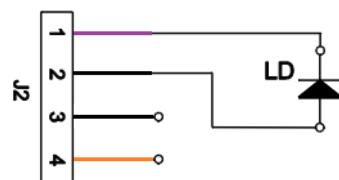


Rysunek 4.11: Style podłączenia lasera i fotodiody do zasilacza [14]

Ze względu na korzystanie z trybu stałego prądu, a nie stałej mocy, nie wykorzystywane jest sprzężenie zwrotne od fotodiody w zasilaczu. Dlatego zdecydowano o wyborze stylu D, gdzie laser i fotodioda nie są ze sobą połączone. W tej opcji wymagane jest połączenie z worką pinu JMP1 z pinem AG oraz zainstalowanie zworki w wyprowadzaniu JMP3. Dodatkowo aby wybrać tryb stałego prądu należy połączyć ze sobą przy pomocy zworki pin JMP2 z pinem ACC.

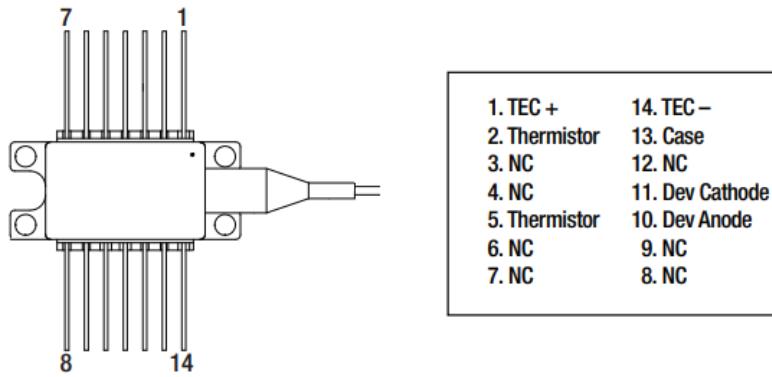
Przed pierwszym podłączeniem zasilania należy ustawić wszystkie 3 potencjometry P/I, PLIM, ILIM ADJ na minimum (kilka-kilkanaście obrotów przeciwnie do ruchu wskaźówek zegara). Po tym zabiegu należy podłączyć napięcie zasilające. Gdy układ już działa należy ustawić limit prądu wyjściowego zasilacza, kręcząc potencjometrem ILIM ADJ zgodnie z ruchem wskaźówek zegara i obserwując aktualny limit poprzez pomiar napięcia w punkcie kontrolnym ILIM zgodnie z przelicznikiem 1A/1V. Dla bezpieczeństwa lasera najlepiej ustawić limit na wartość mniejszą niż limit pracy lasera np. 250 mA.

W kolejnym kroku można przystąpić do podłączenia lasera do zasilacza. Złącze J2 posiada 4 wyprowadzone przewody z czego dwa (fioletowy i czerwony) są odpowiedzialne za zasilanie lasera i dwa pozostałe (czarny i pomarańczowy) są odpowiedzialne za podłączenie fotodiody i pozostają one niepodłączone. Podłączenie lasera przebiega zgodnie ze schematem na rysunku 4.12.



Rysunek 4.12: Schemat podłączenia lasera do zasilacza (opracowanie własne na podstawie [14])

Do pierwszego wyjścia (przewód fioletowy) zostaje podłączona katoda lasera – wyjście numer 11 (zgodnie z opisem wyprowadzeń 4.13), do drugiego wyjścia zasilacza (czarny przewód) zostaje podłączona anoda lasera – wyjście numer 10.



Rysunek 4.13: Schemat budowy lasera wraz z opisem wyprowadzeń [10]

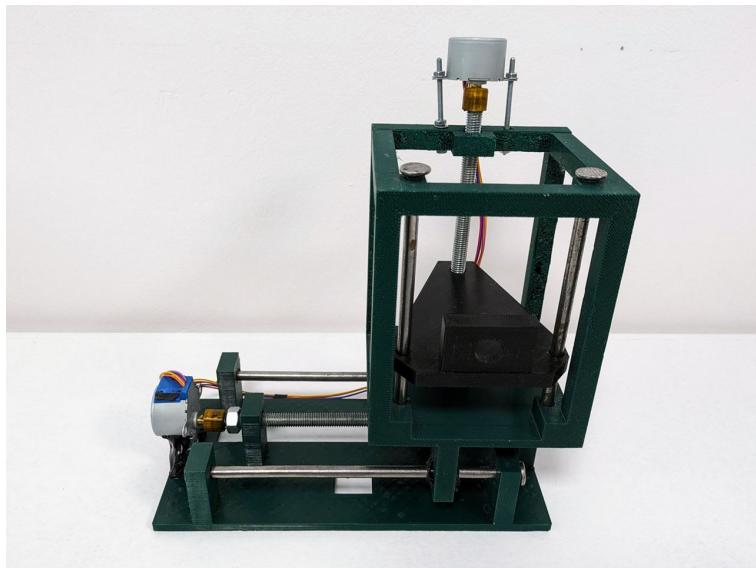
Po podłączeniu odpowiednich przewodów możliwe jest włączenie zasilania lasera przy pomocy przycisku ENABLE lub jego zdalne włączanie poprzez zwarcie pierwszych dwóch pinów wyjścia J4. Gdy przez laser zaczyna płynąć prąd powinna zaświecić się zielona dioda LD_ON. Możliwe jest ustawienie prądu jaki ma płynąć przez laser poprzez obracanie potencjometru ILIM ADJ zgodnie z ruchem wskazówek zegara, obserwując jednocześnie aktualny prąd poprzez pomiar napięcia punktu kontrolnego Ild zgodnie z przelicznikiem 1A/1V. Podczas pierwszego testu działania lasera ustawiono prąd lasera na 50 mA na początku zakresu jego pracy. Po skierowaniu wiązki w stronę fotodiody ze wzmacniaczem zaobserwowano wzrost sygnału, co świadczy o prawidłowym uruchomieniu lasera.

4.3 Geometria komory i drogi optycznej

Po sprawdzeniu działania kluczowych komponentów, przystąpiono do ustawiania wszystkich elementów układu optycznego w celu stworzenia drogi optycznej dla wiązki przechodzącej przez mierzony gaz.

Przekrój wiązki z kolimatorem i bez

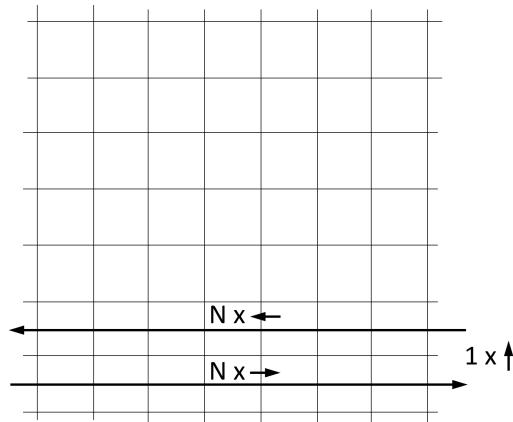
Pierwszym krokiem do zaznajomienia się ze sposobem rozchodzenia się wiązki oraz możliwościami pomiarowymi układu było zbadanie przekroju wiązki lasera w różnych odległościach z kolimatorem oraz bez. W tym celu skonstruowano urządzenie, którego zdjęcie przedstawione jest na rysunku 4.14



Rysunek 4.14: Zdjęcie urządzenia, służącego do pomiaru przekroju wiązki lasera

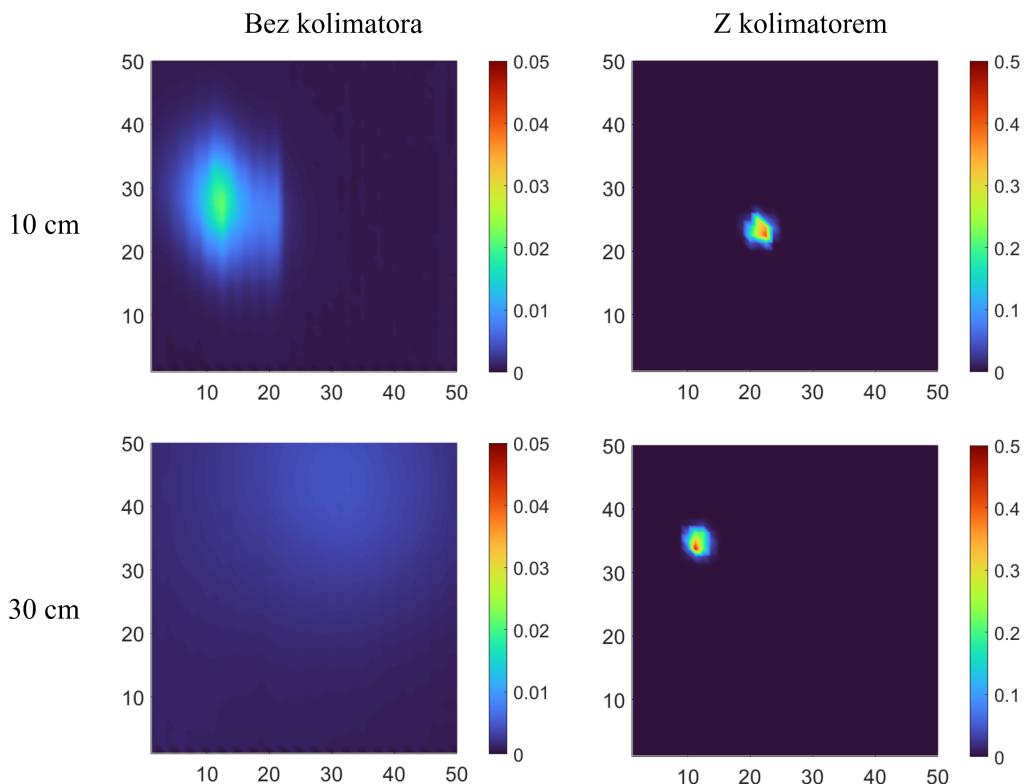
Przy pomocy druku 3D zostały stworzone jego 3 główne części, które połączono ze sobą przy pomocy gładkich i gwintowych metalowych prętów. Jedna z części stanowi podstawę urządzenia, druga jest platformą przesuwającą się w poziomie, a trzecia platformą poruszającą się w pionie. Posiada ona zaprojektowane mocowanie dla fotodiody. Do prętów gwintowanych przymocowane zostały silniki krokowe, które obracając się przemieszczają fotodiodę w dwóch osiach - poziomej i pionowej.

Dla urządzenia został stworzony program pozwalający na zmierzenie przekroju natężenia wiązki lasera. Zadaniem programu było wykonanie pomiaru, przy pomocy przetwornika, wzmacnionego sygnału z fotodiody. W kolejnym kroku odpowiedni silnik wykonuje obrót, tak aby przemieścić fotodiodę o zadaną odległość w odpowiednim kierunku. Całość powtarza się aż fotodioda wykona mapę pomiarów na siatce NxN (w tym przypadku 40x40), tak jak to zostało przedstawione na schemacie 4.15.



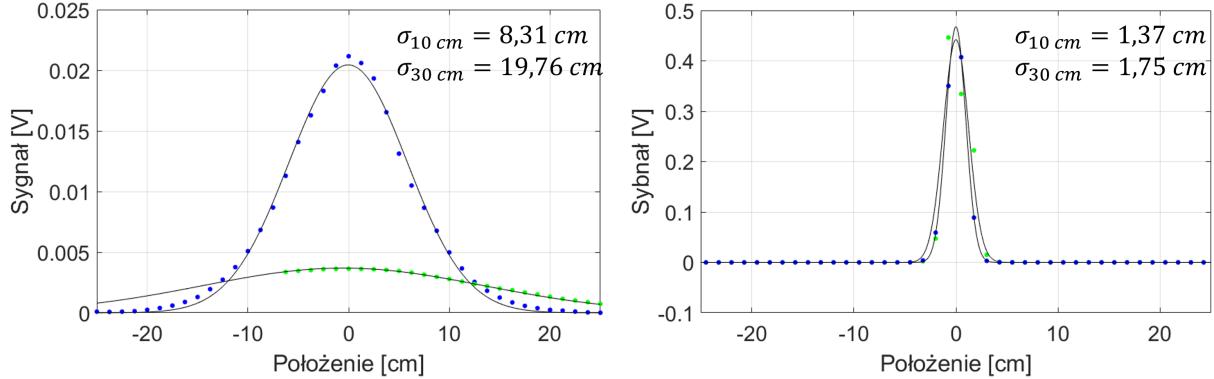
Rysunek 4.15: Ilustracja, przedstawiająca sposób poruszania się platformy z fotodiodą

Urządzenie zostaje ustawione na przeciwnie do lasera i uruchomione. W rezultacie używana jest mapa natężenia przekroju wiązki. Wykonano pomiar w odległości 10 cm, 30 cm oraz 50 cm od źródła wiązki dla lasera, z kolimatorem i bez. Mapy zostały wykonane na siatce 40 x 40 punktów odległych od siebie o 1,25 mm, a więc zajmujących obszar 50 mm x 50 mm. Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone dla tego samego prądu lasera – 50 mA oraz tego samego wzmacniacza wzmacniacza 10kV/A. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 4.16.



Rysunek 4.16: Mapy przekroju wiązki lasera bez kolimatora i z kolimatorem

Przyglądając się wykresom należy zwrócić uwagę na skalę kolorów dla map, przy stosowaniu kolimatora lub bez. Różnią się one od siebie 10 - krotnie (skala wyrażona jest w woltach). Dodatkowo sporządzono wykresy sygnału od położenia dla linii, w której znajdowało się maksimum sygnału. Wykresy zostały przedstawione na rysunku 4.17



Rysunek 4.17: Wykresy przestawiające pojedyncze przejście fotodiody przez maksimum wiązki; kolor niebieski – odległość 10 cm, kolor zielony - odległość 30 cm

Widoczna jest wyraźna różnica między rozbieżnością oraz mocą wiązki dla tych dwóch rodzajów wiązek, co potwierdza wcześniejsze teoretyczne rozważania. Wykonując pomiar udało się tym samym sprawdzić możliwości pomiarowe układu.

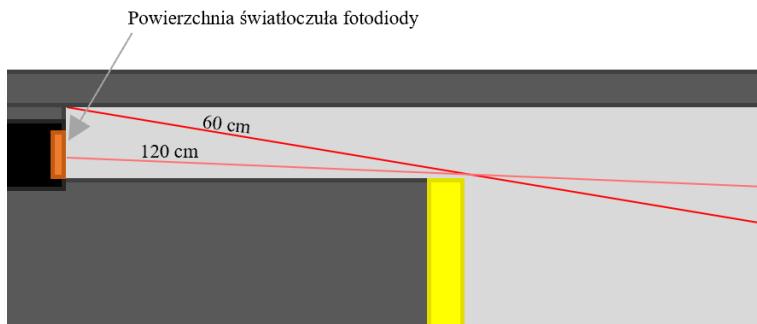
Wybór geometrii komory

Mając potwierdzenie w prawidłowej pracy lasera oraz układu odczytującego natężenie wiązki, a także wielkości rejestrowanego sygnału, przystąpiono do ustawiania lasera i fotodiody w celu stworzenia jak najbardziej korzystnej drogi optycznej, biorąc pod uwagę wcześniejsze rozważania teoretyczne. Ustalono, że maksymalna długość komory, która będzie możliwa do zmieszczenia w przenośnym urządzeniu, wynosi 30 cm i dla takiej długości wykonywano próby.

W pierwszej kolejności przetestowano układ numer 1 przedstawiony w podrozdziale 3.5, w którym laser z kolimatorem i fotodiodą są ustawione naprzeciwko siebie. Jednak droga optyczna uzyskana w ten sposób była bardzo krótka - równa długości komory (30 cm).

Następną próbę stanowił układ numer 2 z dwoma dodatkowymi zwierciadłami głowymi. Możliwe było ustawić wiązkę tak aby odbić się raz od zwierciadła i trafiła do fotodiody. Większa liczba odbić była trudna do uzyskania ze względu na konieczność bardzo dokładnego ustawiania kąta nachylenia wiązki w pionie i w poziomie. Dla większej liczby odbić, gdy wiązkę udało się skierować na fotodiodę, sygnał był szybko tracony pod wpływem minimalnych drgań. Układ taki był niestabilny i realna długość drogi optycznej uzyskanej w ten sposób to około dwukrotność długości komory czyli trochę ponad 60 cm. Ze względu na brak powodzenia w tym sposobie ustawienia nie testowano układu numer 3 z dwoma dodatkowymi małymi zwierciadłami.

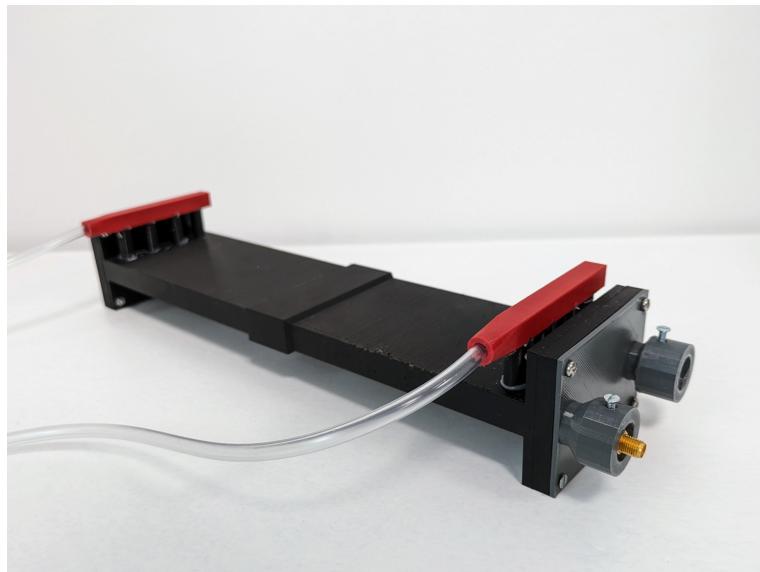
Ostatnim ustawieniem komory jaki wypróbowano był układ 4 z pominięciem kolimatora i zastosowaniem rozbieżnej wiązki odbijającej się pomiędzy dwoma zwierciadłami. Ten rodzaj ustawnienia był najprostszym ze wszystkich, nie było konieczności celowania wiązką tak aby trafiła w fotodiodę. Sygnał odbierany w ten sposób był znacznie niższy, jednak po zastosowaniu większego wzmacnienia – 100 kV/A, był on wystarczający do dalszej analizy. Ze względu na największą stabilność wiązki zdecydowano o zastosowaniu właśnie tego ustawienia. Długość wiązki trafiającej do fotodiody wynosiła co najmniej dwukrotność długości komory, a w rzeczywistości trafiały do niej fragmenty wiązki które wykonywały różną liczbę odbić pokonując tym samym różne długości drogi będące parzystą wielokrotnością długości komory tj. 60 cm, 120 cm itd. Aby wyeliminować te części wiązki, które pokonują najkrótszy dystans a pozostawić tylko te, które pokonują 120 cm i więcej, zastosowano odpowiednie ułożenie fotodiody które pozwala na trafienie do niej tylko tych promieni które poruszają się pod jak najmniejszym kątem względem jej osi.



Rysunek 4.18: Schemat ustawienia fotodiody w komorze

Na rysunku 4.18 został przedstawiony schemat ustawienia fotodiody. Nie jest ona umiejscowiona tuż obok zwierciadła, lecz jest lekko przesunięta do tyłu. Dzięki temu średnia długość wiązki trafiającej do fotodiody jest znacznie dłuższa.

Ostateczne wymiary wewnętrzne komory wynoszą 30,0 cm x 7,1 cm x 1,0 cm, co przekłada się na objętość równą 213 cm³. W celu zapewnienia jednorodności przepływu w komorze zastosowano 4 otwory wlotowe i 4 otwory wylotowe dla mierzonego gazu. Na rysunku 4.19 przedstawiono zdjęcie komory wraz z zamontowaną fotodiodą.

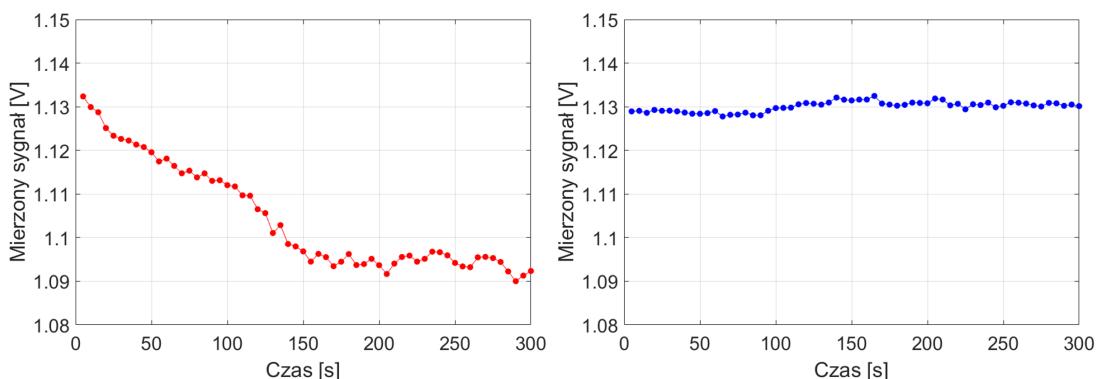


Rysunek 4.19: Zdjęcie użytej komory

Po zmontowaniu całości dokonano pomiaru natężenia przepływu powietrza z włączoną pompą. Otrzymana wartość wyniosła 2 l/min, co w zestawieniu z objętością komory przekłada się na czas wymiany równy około 6 s.

4.4 Stabilizacja temperatury lasera

Po uruchomieniu pomiaru sygnału lasera przez dłuższy czas obserwowało stopniowe zmniejszanie się sygnału. Źródłem tego efektu najprawdopodobniej była zmiana temperatury lasera i tym samym zmiany w jego spektrum oraz mocy optycznej. W celu potwierdzenia przypuszczeń oraz próby zmniejszenia tego efektu przeprowadzono 2 pomiary zmiany sygnału. Jeden pomiar bez zasotowania stabilizacji temperatury i drugi po umieszczeniu lasera pomiędzy dwoma dużymi radiatorami wykonanymi z aluminium, z zastosowaniem pasty termoprzewodzącej. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunku 4.20.

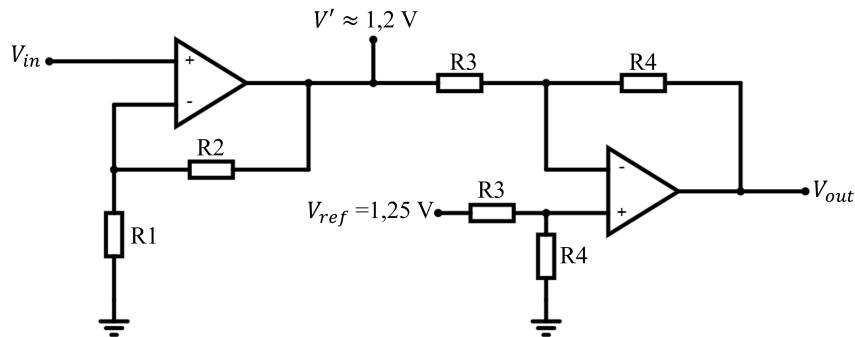


Rysunek 4.20: Uzyskane wyniki pomiaru zależności sygnału od temperatury lasera

Widoczna jest wyraźna poprawa jeśli chodzi o dryf temperaturowy. Niestety widoczne są też spore wahania sygnału rzędu kilku mV, których pochodzenie jest trudne do wyjaśnienia.

4.5 Wzmocnienie efektywnej części sygnału

Dla stężeń metanu rzędu pojedynczych promili osłabienie wiązki wynosi ułamki procenta i może być trudno mierzalne. W celu wyraźniejszej obserwacji osłabienia sygnału zaproponowano zastosowanie specjalnego układu elektronicznego na bazie wzmacniaczy operacyjnych. Schemat układu został przedstawiony na rysunku 4.21.



Rysunek 4.21: Schemat układu wzmacniającego zmiany sygnału

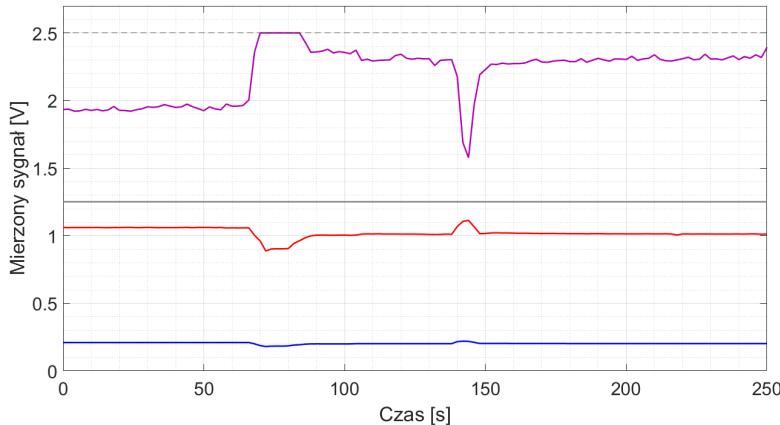
$$V' = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.1)$$

$$V_{out} = (V_{ref} - V') \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (4.2)$$

gdzie:
 V_{in} – napięcie pochodzące ze wzmacniacza transimpedancyjnego fotodiody
 V' – napięcie wstępnie wzmacniane do poziomu około 1,2V (dla wiązki nieosłabionej)
 V_{ref} – stałe napięcie referencyjne
 V_{out} – napięcie wyjściowe
 $R1, R2, R3, R4$ – rezystancje użytych oporników

Pierwszy ze wzmacniaczy tworzy układ wzmacniacza nieodwracającego i stanowi wstępne wzmacnianie sygnału, tak aby jego wartość wynosiła około 1,2 V gdy wiązka jest nieosłabiona. Kolejny segment jest to układ wzmacniacza różnicowego, na którego wejście odwracające podany jest przetwarzany sygnał natomiast na wejście nieodwracające podane jest stałe napięcie równe około 1,25 V, pochodzące ze źródła napięcia referencyjnego. Dzięki odpowiedniemu dobraniu wartości rezystorów na wyjściu układu otrzymywana jest różnica sygnałów wejściowych pomnożona przez czynnik 10x. Dzięki temu rozwiązaniu każda zmiana wartości sygnału będzie 10-krotnie większa i znacznie wyraźniejsza. Zmniejszy się dzięki temu stosunek sygnału do szumu przetwornika ADC.

Wykonano pomiar w którym mierzono jednocześnie przebieg sygnału na jego różnych etapach, przy zmienianiu mocy lasera.

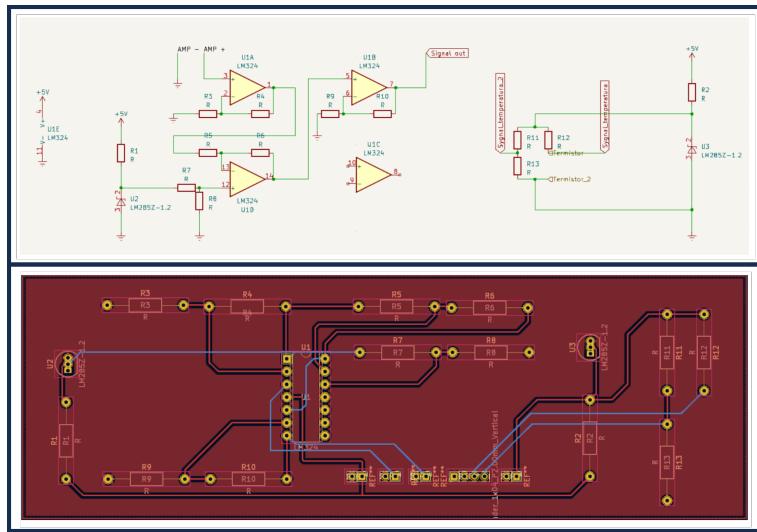


Rysunek 4.22: Test układu wzmacniającego zmiany sygnału

Na wykresie widoczne są 4 krzywe pomiarowe. Kolorem szarym oznaczone jest napięcie ze źródła referencyjnego na poziomie 1,25 V, jest ono na stałym poziomie. Kolorem niebieskim oznaczony jest nieprzetworzony sygnał pochodzący ze wzmacniacza fotodiody na poziomie około 0,2 V. Widoczne są delikatne zmiany w chwilach, w których była zmieniana moc lasera pomiędzy 60. a 150. sekundą pomiaru. Kolorem czerwonym oznaczony jest pomiar napięcia po przejściu przez wzmacniacz nieodwracający o około 5-krotnym wzmacnieniu. Sygnał ten utrzymuje się na poziomie około 1V, a wszystkie zmiany mocy wiązki są wyraźniej widoczne, co świadczy o poprawności działania tego segmentu. Ostatnia krzywa oznaczona kolorem fioletowym stanowi sygnał pomiarowy na wyjściu układu wzmacniacza różnicowego. Bardzo wyraźnie widoczne są różnice pomiędzy krzywą czerwoną a szarą. Wszelkie zmiany sygnału mają przeciwny znak w stosunku do zmian sygnału z fotodiody co jest zgodne z oczekiwaniami. W przedziale między 70. a 85. sekundą wartość sygnału przekroczyła zakres pomiarowy 2,5 V, przez co jest widoczne odcięcie sygnału w tym zakresie. Należy uważać na to zjawisko i rozważyć mniejsze wzmacnienie różnicicy lub jakiś rodzaj jego przełączania. Kolejnym widocznym efektem są stosunkowo duże wahania sygnału, które najprawdopodobniej pochodzą od zmian warunków pracy lasera i mogą stanowić wyzwanie podczas wykonywania pomiaru stężenia metanu.

4.6 Układ elektroniczny

Pierwsze testy połączeń były realizowane przy pomocy płytka stykowej oraz prostych przewodów połączeniowych. Docelowo projekt zostanie przeniesiony na dedykowaną płytę drukowaną w celu zapewnienia stabilności połączeń, natomiast wszystkie przewody odpowiedzialne za przesył sygnałów zostały zamienione na ekranowane w celu wyeliminowania zakłóceń generowanych na przewodach przesyłowych. Schemat płytki drukowanej w celu jej zamówienia został stworzony przy pomocy oprogramowania KiCad a jego wygląd został przedstawiony na rysunku 4.23



Rysunek 4.23: Projekt płytka drukowanej wykonany w programie KiCad

4.7 Montaż elementów

Całość urządzenia została zabudowana w czarnej walizce o wymiarach 45 cm x 34 cm x 15 cm. Na jej górnej pokrywie został zamontowany dotykowy ekran, służący do obsługi urządzenia i wyświetlania wyników pomiarów. Z lewej strony obudowy znajduje się wejście na przewód zasilający,łącznik zasilania 230V oraz łącznik zasilania awaryjnego wraz ze wskaźnikiem jego naładowania. Ponadto znajdują się tu zawory wlotu oraz wylotu dla mierzonego gazu i łącznik pompki. Dodatkowo na skrajnych miejscach obudowy znajdują się wentylatory zapewniające przepływ powietrza wewnętrz obudowy tak aby odprowadzać wytwarzane wewnętrz ciepło (rysunek 4.24).



Rysunek 4.24: Zdjęcie obudowy wraz z widocznymi elementami analizatora

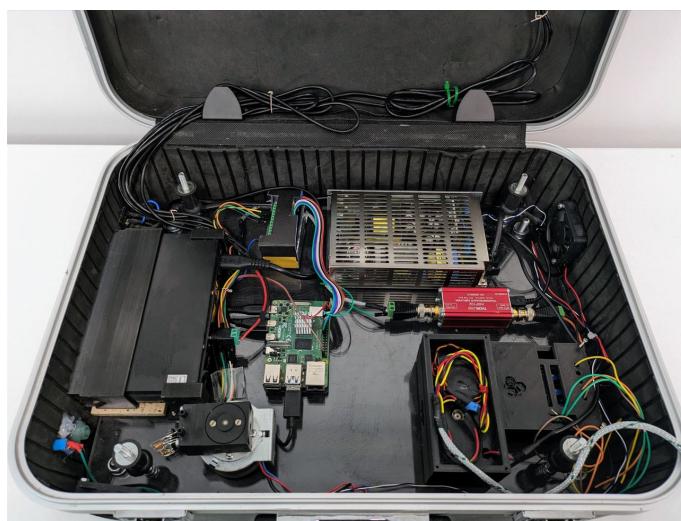
Wewnątrz obudowy elementy zostały zamontowane na dwóch poziomach z płyt, z two- rzywa sztucznego. Płyty te zostały ze sobą połączone przy pomocy odpowiednich łączników niwelujących przenoszenie drgań pomiędzy warstwami.

Na górnym poziomie znajduje się układ optyczny, tzn cała wnęka optyczna, fotodioda oraz laser zamontowany pomiędzy dwoma radiatorami. Światłowód został umieszczony w specjalnie zaprojektowanym i wydrukowanym mocowaniu, w celu jego unieruchomienia oraz ochrony przed zniszczeniem. Przewody doprowadzone do lasera oraz fotodiody zostały poprowadzone na tył obudowy i tam przechodzą na dolną warstwę.



Rysunek 4.25: Zdjęcie górnej warstwy wnętrza urządzenia

Na niższym poziomie znajduje się cała pozostała elektronika, tj. 2 zasilacze całego układu, pompka, zasilacz lasera, wzmacniacz sygnału fotodiody, RaspberryPi, przetwornik ADC oraz układ elektroniczny odpowiedzialny za przetwarzanie sygnału (rysunek 4.26).



Rysunek 4.26: Zdjęcie dolnej warstwy wnętrza urządzenia

Dla większości elementów zostały zaprojektowane oraz wydrukowane w 3D mocowania pozwalające na stabilne zamontowanie ich w obudowie.

5 Realizacja oprogramowania

W celu łatwej i intuicyjnej obsługi urządzenia został stworzony program z interfejsem graficznym. Program pozwala na uruchomienie pomiaru, stałą jego obserwację, ustawianie parametrów oraz ułatwia diagnostykę w przypadku występowania nieprawidłowości. Został on zaprojektowany z myślą o dalszym rozwoju projektu, z tego względu zawiera on funkcje przygotowane na podłączenie różnych czujników i układów kontrolujących np. temperaturę, lecz zostają one wyciszone przed dodaniem tych elementów do układu.

5.1 Użyte technologie

Język programowania

Podczas tworzenia oprogramowania zdecydowano o użyciu języka Python. Wybór ten kierowany był łatwością pracy w tym języku. Język ten cieszy się dużą popularnością przez co dostępna jest duża baza bibliotek, które są dobrze opisane przez ich użytkowników. Ponadto tego typu rozwiązanie jest darmowe, a interpreter języka Python jest wbudowany w system operacyjny Linux dostępny na Raspberry.

W projekcie wykorzystano następujące biblioteki:

- PyQt5 – interfejs graficzny
- time – pomiar czasu przez program
- numpy – obliczenia numeryczne na zmiennych
- matplotlib – tworzenie wykresów
- csv, json – obsługa plików typu .csv oraz .json

Biblioteka PyQt5 zapewnia narzędzia z GUI (ang. *Graphical User Interface*) służące do łatwego projektowania interfejsu graficznego dla własnych programów. Po stworzeniu projektu otrzymywany jest plik z rozszerzeniem .ui, który następnie jest konwertowany na kod w języku python w postaci pliku z rozszerzeniem .py. Kod następnie jest wykorzystywany do osadzenia w nim własnego programu z wybranymi funkcjami.

Środowisko programistyczne i zdalna obsługa

Program został stworzony korzystając ze środowiska Visual Studio Code i jego rozszerzenia Remote Control. Rozszerzenie to pozwala na połączenie się przy pomocy komputera z Raspberry znajdującym się w tej samej sieci poprzez SSH. Dzięki temu możliwe jest zdalone edytowanie plików tekstowych i kodu, z poziomu komputera.

Dodatkowo w celu zdalnej obsługi urządzenia wraz z wyświetlonym obrazem na jego ekranie skorzystano z serwisu DWService. W tym celu konieczne jest zainstalowanie na kontrolowanym urządzeniu odpowiedniego oprogramowania oraz wprowadzenie na nim wygenerowanego kodu autoryzacyjnego.

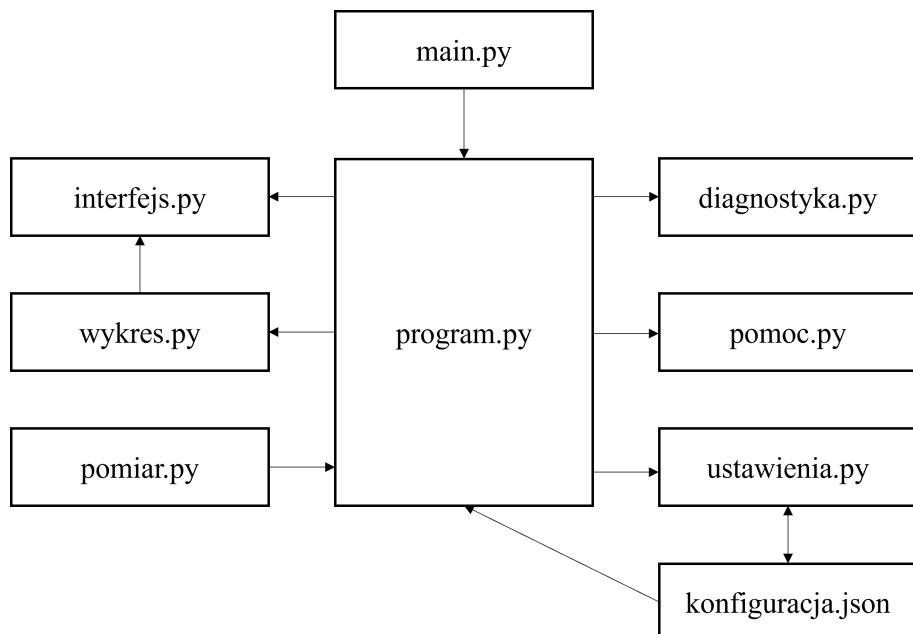
Obydwa opisane rozwiązania znaczaco ułatwiały pracę z urządzeniem i mogą zostać wykorzystywane także podczas jego normalnego użytkowania.

System kontroli wersji

Tworząc kolejne wersje oprogramowania, zapisywano je przy pomocy systemu kontroli wersji GIT. Korzystano z wersji obsługiwanej przez serwis GitHub. Na koniec do repozytorium poza oprogramowaniem dodano także wszystkie programy służące do obliczeń i symulacji w języku MATLAB, używane w projekcie oraz wszystkie pliki projektów 3D. Dzięki temu osoba kontynuująca rozwój projektu będzie miała dostęp do wszystkich plików [24].

5.2 Struktura programu

Na rysunku 5.1 została przedstawiona struktura plików wchodzących w skład programu.



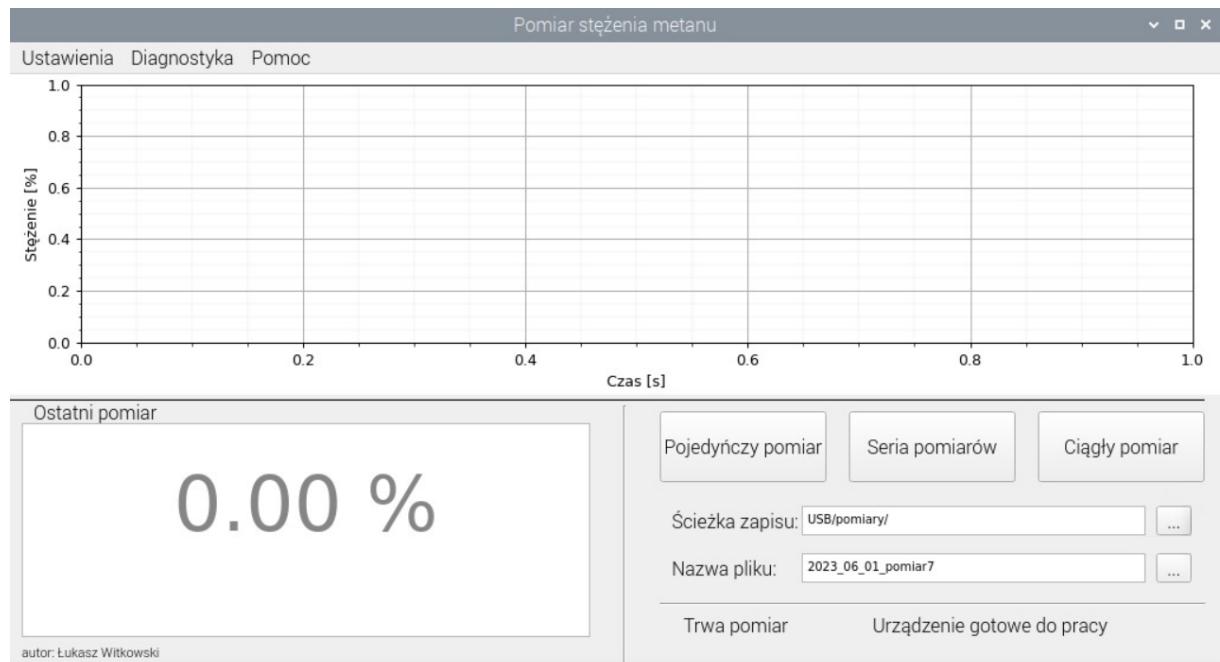
Rysunek 5.1: Struktura plików wchodzących w skład programu

Pierwszym z plików jest plik main.py, jego wykonanie powoduje uruchomienie całego programu. Kolejnym plikiem jest program.py, który stanowi główną część programu. W tym pliku znajdują się połączenia pomiędzy przyciskami i innymi elementami interfejsu a funkcjami wykonującymi pomiar, bądź inne działania, jak np. włączenie ustawień. Znajdują się w nim funkcje przetwarzające zmierzone wielkości, wykonujące obliczenia oraz zapisujące wyniki do pliku. W pliku interfejs.py opisany jest wygląd głównego okna programu, zdefiniowane są tam pola tekstowe, przyciski oraz pole na wykres. Jego zawartość jest zmieniana poprzez funkcje zawarte w pliku program.py. Plik wykres.py na podstawie dostarczonych danych generuje wykres oraz aktualizuje go zmieniając zawartość okna wykresu w pliku interfejs.py. W pliku pomiar znajdują się funkcje oraz pętle

odpowiedzialne za wykonywanie pomiarów. Plik diagnostyka.py zawiera wygląd okna diagnostycznego, w którym możliwe jest odczytanie różnych parametrów urządzenia. Plik pomoc.py zawiera okno z krótkim opisem działania programu. Plik ustawienia.py zawiera wygląd okna, w którym możliwa jest zmiana parametrów pracy programu, takich jak częstotliwość próbkowania czy ścieżka zapisu. Wszystkie te parametry zapisane są w pliku konfiguracja.json, dzięki czemu po ich zmianie, po ponownym uruchomieniu zapamiętane zostanie ostatnie ustawienie.

5.3 Działanie programu

Program został dodany do listy autostartu Raspberry, dzięki czemu po podaniu zasilania do urządzenia, automatycznie zostanie otwarte okno główne programu. Na rysunku 5.2 został przedstawiony jego zrzut ekranu.



Rysunek 5.2: Zrzut ekranu z okna głównego programu

Górną połowę okna zajmuje obszar przeznaczony na wykres wykres mierzzonego w czasie stężenia metanu lub innej wartości (w zależności od ustawień). W dolnej połowie po lewej stronie dużą czcionką wyświetlana jest ostatnia zmierzona wartość. Po prawej stronie znajdują się trzy przyciski rozpoczętające pomiar. Możliwe jest wykonanie pojedynczego pomiaru po kliknięciu pierwszego przycisku, drugą opcją jest wykonanie serii pomiarów np. 1000 (liczba zależy od ustawień). Ostatnią opcją jest wykonywanie pomiarów zadaną częstotliwością aż do momentu ich zatrzymania. Gdy zostanie uruchomiony przycisk pomiar ciągły, w jego miejscu wyświetlany jest napis "Stop", wtedy ten przycisk zatrzymuje pomiary. Częstotliwość pomiarów jest regulowana w ustawieniach.

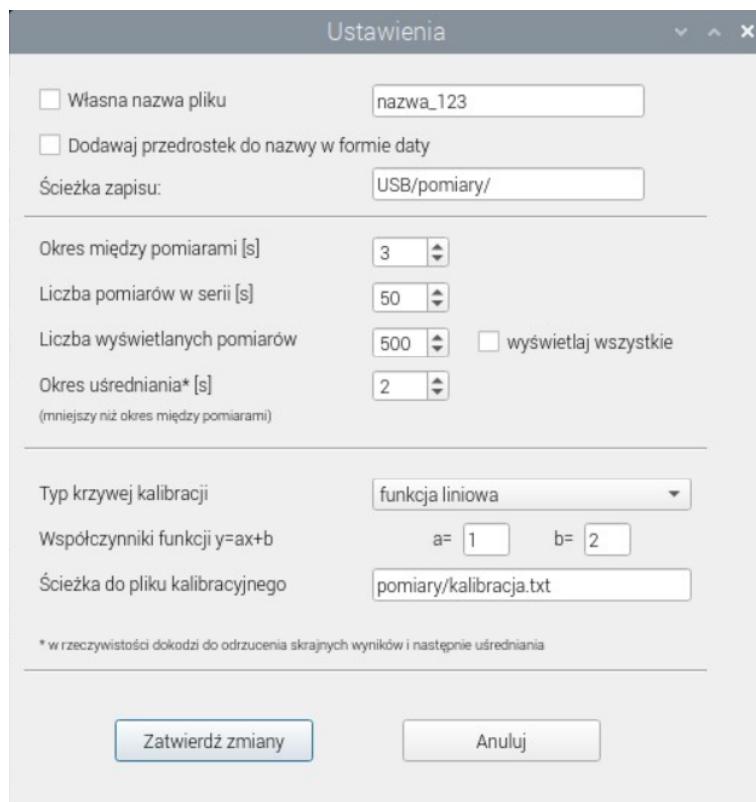
Poniżej przycisków znajduje się ścieżka zapisu oraz nazwa pliku wyjściowego, po kliknięciu przycisku z trzema kropkami obok, możliwa jest ich zmiana. Jeszcze niżej znajdują

się dwa napisy – pierwszy informuje o tym czy obecnie uruchomiony jest pomiar; drugi informuje o gotowości urządzenia do pracy. Po uruchomieniu konieczne jest oczekanie aż temperatura lasera zostanie ustabilizowana.

Na samej górze okna znajduje się pasek narzędzi z trzema przyciskami "Ustawienia", "Diagnostyka" oraz "Pomoc". Kliknięcie przycisku otwiera odpowiednie okno.

Ustawienia

Na rysunku 5.3 został przedstawiony zrzut ekranu z okna ustawień.



Rysunek 5.3: Zrzut ekranu z okna ustawień

Pierwszymi parametrami, które są możliwe do ustawienia są informacje związane z plikiem wyjściowym. Domyślnie program generuje plik o nazwie "pomiar" z rozszerzeniem csv, a przy każdym kolejnym uruchomieniu pomiarów, w celu uniknięcia konfliktu na końcu dodaje numer np. "pomiar4". Pierwszą z opcji dostępnych dla użytkownika jest wybór własnej nazwy i wprowadzenie jej. W tym celu wymagane jest podłączenie klawiatury do portu USB. Kolejną opcją, którą może włączyć użytkownik jest automatyczne dodanie do nazwy pliku przedrostka w formie aktualnej daty. Może to ułatwić identyfikację plików pomiarowych. Ostatnią opcję związaną z plikiem wyjściowym jest wybór ścieżki zapisu pliku.

Kolejne parametry związane są z przeprowadzaniem pomiarów. Możliwe jest ustawienie odstępu pomiędzy pomiarami, liczby wykonywanych pomiarów w serii (w przypadku tego sposobu pomiaru), liczby wyświetlanych na wykresie pomiarów, a także okres uśredniania pomiarów. Ostatni parametr związany jest z wybraną metodą obróbki danych opis

saną w części pracy związanej z przetwornikiem ADC. Opisuje on okres, w czasie którego wykonywany jest ciąg pomiarów z częstotliwością 100 SPS. Następnie z tego zestawu pomiarów odrzucone zostają skrajne wyniki i z pozostaje połowy obliczana średnia.

Ostatnim z parametrów, który użytkownik może dostosować w oknie ustawień jest typ krzywej kalibracji. W zależności od użytego sposobu przetworzenia sygnału oraz zakresu stężeń i stopnia osłabienia wiązki możliwe są różne przybliżenia zależności pomiędzy stężeniem metanu w komorze a mierzonym sygnałem. Na rysunku 5.4 została przedstawiona rozwinięta lista dostępnych dla użytkownika typów krzywych.



Rysunek 5.4: Zrzut ekranu z rozwiniętej listy dostępnych krzywych kalibracji

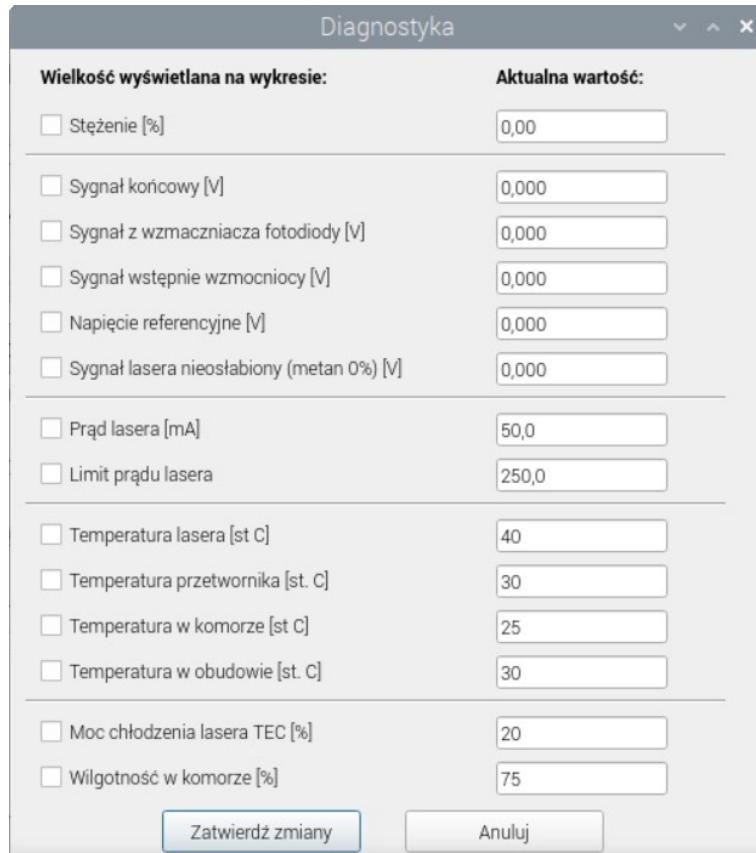
Do wyboru dostępne są 4 typy funkcji: liniowa, kwadratowa, eksponencjalna i logarytmiczna. Po wyborze typu krzywej poniżej wyświetla się jej wzór oraz okna współczynników występujących we wzorze, które należy uzupełnić. Następnie podczas wykonywania pomiarów do obliczania stężenia na podstawie mierzonego sygnału zostanie wykorzystany wybrany wzór funkcji. Użytkownik ma też możliwość wyboru własnego zestawu punktów tworzących krzywą kalibratorystyczną. Po wyborze tej opcji konieczne jest wprowadzenie nazwy pliku zawierające współrzędne punktów. W przypadku tej opcji stężenie obliczane jest poprzez interpolację pomiędzy punktami. Dla tej metody wymagane jest aby mierzone wartości sygnału mieściły się w zakresie między minimalną a maksymalną wartością sygnałów na liście kalibratorystycznej.

Po ustawieniu wybranych parametrów należy kliknąć przycisk "Zatwierdź" w celu zapisu zmian. Nowe parametry zostaną wprowadzone także w pliku konfiguracja.json, dzięki czemu po kolejnym uruchomieniu programu, nie będzie potrzeby wprowadzania wszystkich parametrów od nowa.

Diagnostyka

Drugim oknem dostępnym w pasku narzędzi jest "Diagnostyka". Jego zrzut ekranu został przedstawiony na rysunku 5.5.

W tym oknie znajduje się lista wszystkich dostępnych parametrów mierzonych przez urządzenie. Po prawej stronie wyświetlana jest ostatnio zmierzona bądź ustalona wartość natomiast po lewej stronie przy każdej nazwie znajduje się okno wyboru. Przy pomocy okien wyboru użytkownik może wybrać jakie wartości mają być wyświetlane na wykresie. Domyslnie wyświetlana jest obliczona wartość stężenia. Możliwe jest ustawienie kilku różnych parametrów, wyświetlane będzie wtedy kilka krzywych w różnych kolorach. Warunkiem dla takiego ustawienia jest to, że wszystkie wielkości muszą posiadać takie same jednostki.



Rysunek 5.5: Zrzut ekranu z okna diagnostyki

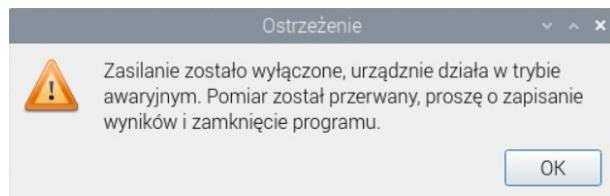
Przy pomocy opisanego w poprzednim rozdziale algorytmu pomiarowego mierzona jest tylko wartość sygnału końcowego, na podstawie którego obliczane jest stężenie metanu. Wszystkie inne wielkości mierzone są przy pomocy pozostałych wyjść przetwornika z ustawioną częstotliwością 20 SPS lub przy pomocy dodatkowego przetwornika 18-bitowego, lub też samodzielnie przesyłają wyniki pomiarów poprzez komunikację I2C. Taki podział pozwala na to, aby wszystkie parametry mogły być zmierzone w czasie trwania okresu między wyświetlaniem kolejnych punktów pomiarowych. Pomiar tych parametrów ma na celu ułatwienie diagnostyki i rozwiązywanie problemów w przypadku nieprawidłowości w pomiarze.

Pomoc

Trzecim oknem dostępnym w pasku narzędzi jest "Pomoc". W tym oknie znajduje się instrukcja obsługi programu, oraz krótki opis zasady działania urządzenia. Dodatkowo w tym oknie umieszczony jest link do repozytorium GitHub, gdzie znajdują się wszystkie pliki związane z projektem.

Ostrzeżenie

Urządzenie posiada dwa źródła zasilania – jedno wymagające stałego podłączenia do napięcia sieciowego 230V, które odpowiada za zasilanie, lasera, wzmacniacza, pompki oraz wentylatorów. Drugie źródło zasilania stanowi zasilacz awaryjny, który po odłączeniu od napięcia sieciowego jest w stanie pracować jeszcze przez jakiś czas. Odpowiada on za zasilanie Raspberry oraz wyświetlacza. Dzięki takiemu rozwiązaniu po odcięciu zasilania od urządzenia możliwe jest bezpieczne zakończenie pracy programu. W takim przypadku na ekranie wyświetlany jest komunikat o przerwaniu pomiarów. Na rysunku 5.6 został przedstawiony zrzut ekranu z tym komunikatem.



Rysunek 5.6: Zrzut ekranu z komunikatem ostrzegającym o braku zasilania

Po wyświetleniu tego komunikatu należy zamknąć program i wyłączyć Raspberry, tak aby jego praca została bezpiecznie zakończona.

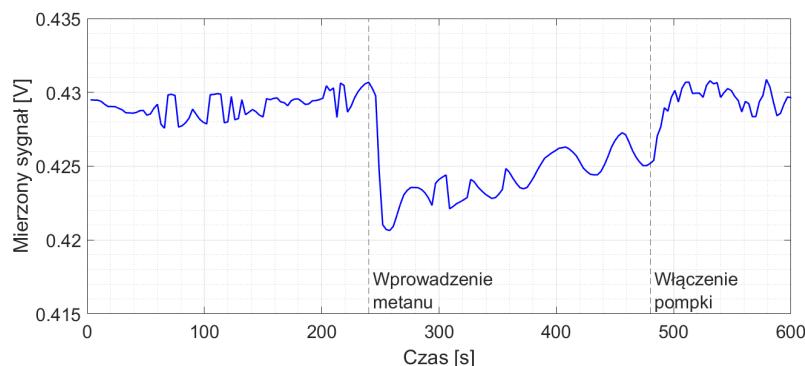
6 Pierwsze testy i perspektywy rozwoju projektu

Po zamontowaniu wszystkich elementów w obudowie, opracowaniu najlepszej metody pomiarowej oraz stworzeniu oprogramowania umożliwiającego ich wykonywanie, przystąpiono do przeprowadzenia testów układu.

6.1 Pierwsze testy reakcji układu na metan

Wprowadzenie mieszaniny o dużym stężeniu metanu

Pierwszym z przeprowadzonych testów było wprowadzenie przy pomocy strzykawki do komory 500 cm^3 mieszaniny metanu z argonem w stosunku 1:9, co przekłada się na 10% stężenie metanu. Wykonywano bezpośredni pomiar sygnału ze wzmacniacza fotodiody, przy wyłączonej pompce. Na rysunku 6.1 został przedstawiony przebieg czasowy mierzonego sygnału.



Rysunek 6.1: Reakcja urządzenia na wprowadzenie dużego stężenia metanu

Na wykresie pionowymi liniami zostało zaznaczony moment wprowadzenia mieszaniny oraz włączenia pompki. Widoczny jest spadek sygnału w momencie wprowadzenia gazu o około 2 %. Następnie sygnał zaczyna powoli powracać do pierwotnego poziomu, a proces ten wyraźnie przyspiesza w momencie włączenia pompki. Świadczy to o zanikaniu obecności metanu w komorze. Niestety poza osłabieniem spowodowanym obecnością metanu, widoczne są bardzo duże wahania sygnału, które nie pozwalają na dokładną ocenę stopnia osłabienia związanego z absorbcją przez metan.

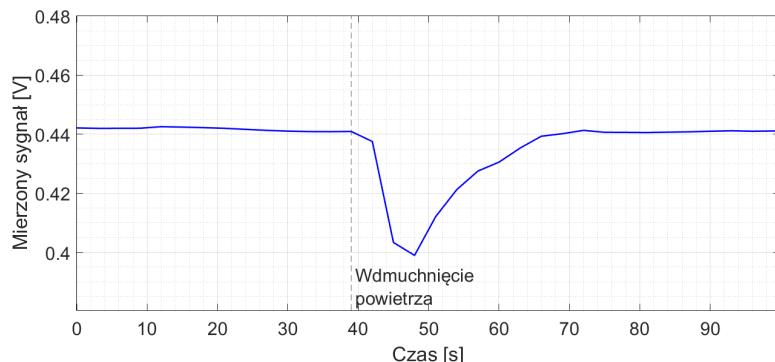
Źródło wahania sygnału było bardzo trudne do ustalenia, mogą do nich należeć np.: zmienne promieniowanie podczerwone tła, które przy dużym wzmacnieniu sygnału z fotodiody (100 kV/A) przekłada się na zauważalne wahania sygnału wyjściowego; brak stabilności zasilania lasera; wahania temperatury lasera; zakłócenia przesyłu sygnału na przewodach; zaburzenia pracy wzmacniacza transimpedancyjnego.

Test na szybie wentylacyjnym KWK "Pniówek"

Przy okazji kampani pomiarowej z udziałem Zespołu Fizyki Środowiska Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej, wykonano testy układu na jego wczesnym etapie działania. Pomiarów dokonywano przy wylocie szybu wentylacyjnego kopalni węgla kamiennego "Pniówek". Wyniki porównywano ze wskazaniami, używanego przez zespół urządzenia firmy Licor. Występujące tam stężenia metanu wynosiły około 3000 ppm. Niestety ze względu na ciągłe duże wahania sygnału i jego dryfy, osłabienie spowodowane obecnością metanu było niemożliwe do odróżnienia w rejestrowanym przebiegu.

6.2 Reakcja układu na wilgotne powietrze

Podczas testowania układu postanowiono wprowadzić do komory wydychane powietrze, poprzez wdmuchnięcie go podłączonym węzykiem. Na rysunku 6.2 widoczny jest przebieg czasowy rejestrowanego sygnału podczas wdmuchiwanego powietrza.



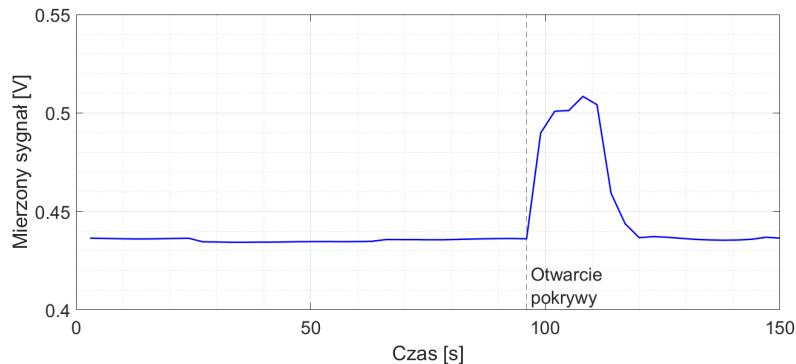
Rysunek 6.2: Reakcja urządzenia na wprowadzenie wydychanego powietrza

Na wykresie pionową linią został zaznaczony moment rozpoczęcia wdmuchiwanego powietrza. Widoczne jest wyraźne osłabienie sygnału na poziomie około 10 %. Osłabienie jest znacznie bardziej wyraźne niż w przypadku wcześniejszego testu z metanem, a po ustaniu wdmuchiwanego powietrza zaczyna powracać do pierwotnego poziomu. Osłabienie może być spowodowane dużym stężeniem niektórych gazów (dwutlenek węgla i para wodna) w wydychanym powietrzu. Jednak ten powód osłabienia byłby niezgodny z wcześniej dokonaną analizą absorpcji promieniowania przez różne rodzaje gazów (rysunek 3.1). Innym wyjaśnieniem, może być zjawisko skraplania się wody z nasyczonego parą wodną ciepłego powietrza z ust na zimniejszych elementach wewnętrz komory takich jak zwierciadła czy fotodioda. Po pewnym czasie wymiany powietrza wewnętrz komory przez pompę skroplone drobinki wody odparowywują i sygnał powraca do pierwotnego poziomu.

Powietrze przy wylocie szybu wentylacyjnego kopalni węgla posiada blisko 100% wilgotność względową, co może skutkować występowaniem podobnego efektu. Zjawisko to jest bardzo niepożądane z punktu widzenia przeprowadzania pomiarów i należy w jak największym stopniu wyeliminować jego wpływ.

6.3 Reakcja układu na czynniki mechaniczne

Podczas przeprowadzania testów zaobserwowano bardzo wyraźną zmianę sygnału po podniesieniu pokrywy walizki do góry. Przebieg czasowy mierzonego sygnału został przedstawiony na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3: Reakcja urządzenia na otwarcie pokrywy

Na wykresie pionową linią została zaznaczony moment podniesienia pokrywy. Widoczny jest wyraźny wzrost mierzonego sygnału o około 17 %. Po chwili pokrywa została z powrotem zamknięta i sygnał wrócił do pierwotnego poziomu. Zmiana sygnału jest bardzo duża w stosunku do zmian zarejestrowanych podczas wprowadzania metanu, a jej źródło jest trudne do zidentyfikowania. Może ona być spowodowana docieraniem do komory promieniowania podczerwonego z otoczenia przy otwartej pokrywie. Jest to jednak mało prawdopodobne ze względu na dość dużą szczelność optyczną komory, w której zamontowana jest fotodioda. W celu weryfikacji tego czynnika powtórzono pomiar przy wyłączonym laserze, nie obserwując przy tym podobnej zmiany sygnału przy otwieraniu komory.

Innym efektem może być występowanie naprężeń niektórych elementów i lekka zmiana ich ustawienia po zamknięciu komory. Należy zidentyfikować źródło tego zaburzenia i je wyeliminować, a jeśli będzie to niemożliwe, wprowadzić zmiany w oprogramowaniu przerywające pomiar po otwarciu obudowy.

6.4 Kontrola parametrów układu

W trakcie pracy nad projektem zarejestrowano wpływ różnych czynników na przeprowadzony pomiar, takich jak:

- temperatura przetwornika ADC - jej wzrost powodował zwiększenie się jego wskazań
- temperatura źródła referencyjnego - jej wzrost powodował spadek napięcia na źródle, które jest wykorzystywane w układzie wzmacniającym zmiany sygnału
- temperatura lasera - jej wzrost powodował spadek siły mierzonego sygnału
- wilgotność powietrza - przy dużym stężeniu pary wodnej obserwowany jest efekt skraplania wody na elementach w komorze, który powoduje osłabienie rejestrowanego sygnału

Ponadto na etapie koncepcyjnym we wzorze 3.9 widoczna jest zależność między stężeniem wyrażonym w jednostce [*cząsteczka/cm³*], a nie tylko stężeniem procentowym mierzonego gazu, ale także jego ciśnieniem i temperaturą.

Z tego względu istotne jest kontrolowanie wymienionych wyżej parametrów oraz w miarę możliwości ich stabilizacja. W tym celu konieczne jest zainstalowanie odpowiednich czujników oraz zintegrowanie ich z oprogramowaniem.

Pierwsze dwa parametry tj. temperatura przetwornika oraz źródła referencyjnego mają stosunkowo mały wpływ na zmiany mierzonego sygnału, a ponadto same nie generują dużych ilości ciepła. Z tego względu wystarczające może być ich odpowiednie umiejscowienie w komorze w miejscu gdzie występuje duży przepływ powietrza oraz dołączenie do nich radiatorów. Jeśli chodzi o parametry mierzonego gazu wlotowego, możliwe jest ich stałe monitorowanie przy pomocy czujników wewnątrz komory, a następnie korygowanie wyników na podstawie wzoru 3.9. Dla stabilizacji temperatury lasera oraz eliminacji pary wodnej zaproponowano specjalne rozwiązania opisane poniżej.

Dokładna stabilizacja temperatury

Do dokładnej stabilizacji temperatury lasera należy wykorzystać wbudowany w jego obudowę termistor oraz kontroler termoelektryczny. W pierwszej kolejności należy zapewnić możliwość pomiaru temperatury poprzez pomiar oporu termistora. Producent lasera zapewnia wzór opisujący zależność pomiędzy temperaturą a oporem termistora.

$$R = R_0 \cdot \exp \left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (6.1)$$

gdzie:

R – opór termistora [Ω],

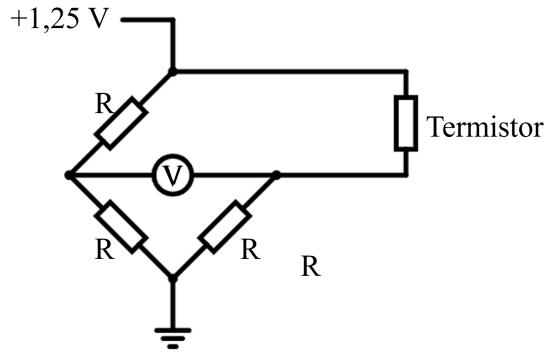
T – temperatura termistora [K],

$R_0 = 10000\Omega$ – stały paramter równania,

$T_0 = 298K$ – stały parameter równania,

$\beta = 3977$ – stały parametr równania

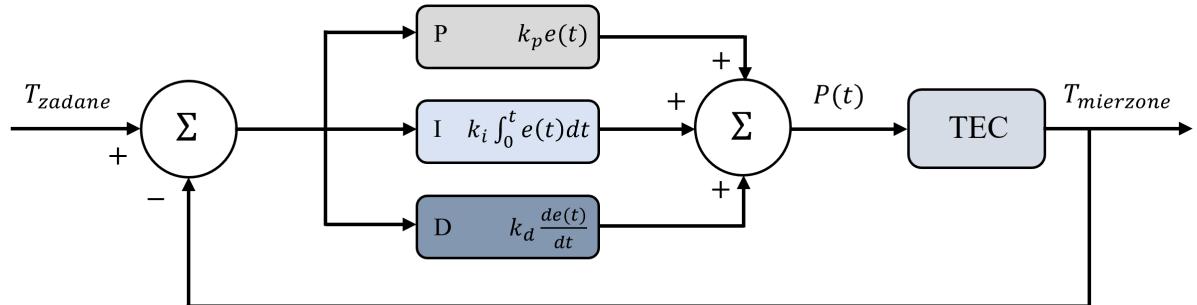
Opór termistora może zostać zmierzony przy pomocy układu zwanego mostkiem Wheatstone'a, którego schemat został przedstawiony na rysunku 6.4.



Rysunek 6.4: Schemat mostka Wheatstone'a służącego do pomiaru oporu termistora

Rezystancja oporników oznaczonych literą R powinna wynosić $10 \text{ k}\Omega$. Pomiar napięcia niezrównoważenia, mierzony woltomierzem oznaczonym na schemacie literą V oraz znamomość rezystancji zastosowanych rezystorów, pozwala na wyznaczenie oporu termistora, a to w połączeniu z zależnością opisaną wzorem 6.1 pozwala na poznanie jego temperatury.

W celu zapewnienia jak największej stabilności temperatury możliwe jest zastosowanie tak zwanego algorytmu PID (z ang. *proportional–integral–derivative controller*), którego schemat działania został przedstawiony na rysunku 6.5:



Rysunek 6.5: Schemat działania algorytmu sterującego PID [22]

Sygnal wyjściowy (moc TEC) tego typu kontrolera jest zależny od 3 składowych [22]:

- czynnik proporcjonalny P – zależny od uchybu $e(t)$ (różnicy między temperaturą zadaną a temperaturą aktualną)
- czynnik całkujący I – zależny od całki po czasie od 0 do t , z uchybu temperatury $\int_0^t e(t)dt$
- czynnik różnicujący – zależny od aktualnej pochodnej po czasie uchybu $\frac{de(t)}{dt}$

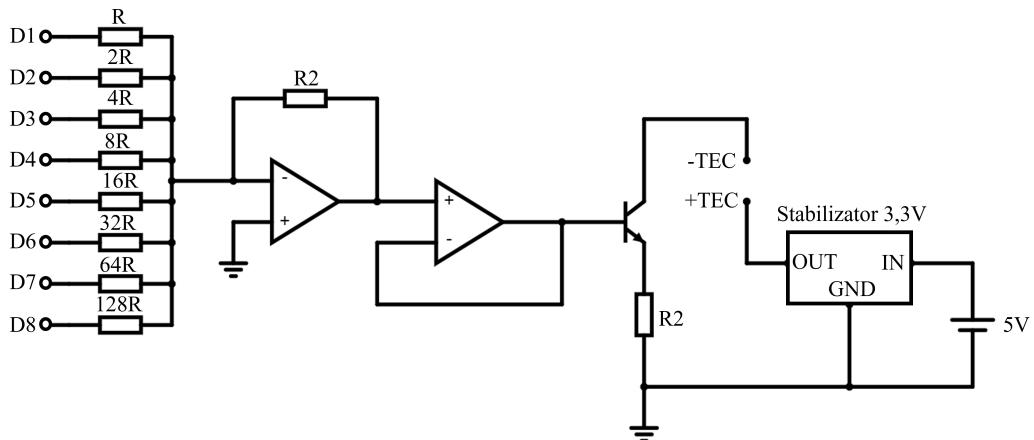
Ostatecznie wartość prądu zadawanego dla TEC opisana jest wzorem:

$$P(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t)dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (6.2)$$

gdzie:

k_p, k_i, k_d - wszródyczyniki dobierane empirycznie dla danego układu.

Ważnym elementem dla tego typu sterowania jest konieczność ustawiania mocy TEC. Ze względu na dostępność dużej liczby pinów cyfrowych w RaspberryPi możliwe jest zastosowanie układu stanowiącego prosty przetwornik cyfrowo-analogowy na bazie drabinki rezystorowej i wzmacniacza operacyjnego. Jego wyjście podłączone do bazy tranzystora NPN steruje prądem gałęzi kolektora gdzie podłączony jest odbiornik w postaci TEC. Schemat układu został przedstawiony na rysunku 6.6:



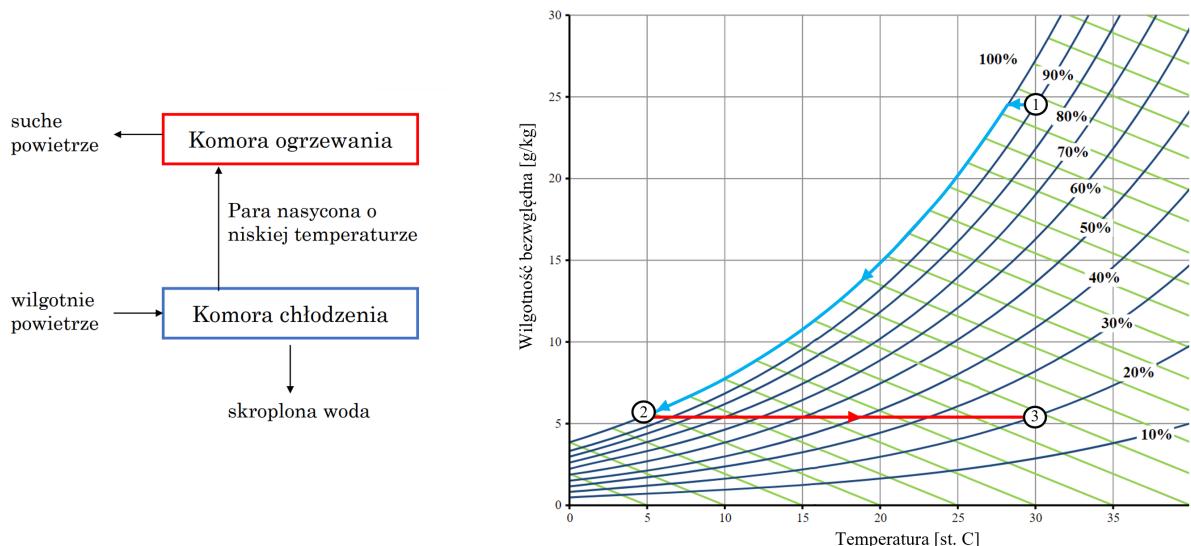
Rysunek 6.6: Schemat układu elektronicznego zasilającego TEC

Ten rodzaj stabilizacji zapewniały stały w czasie poziom temperatury lasera. Zastosowanie dużego radiatora, tak jak to ma miejsce na obecnym etapie projektu w dużym stopniu stabilizuje temperaturę. Jednak podczas długich pomiarów temperatura lasera, pomimo wszystko się zwiększa, przez stałe generowanie ciepła i ogrzewanie radiatorów.

Ograniczanie zawartości pary wodnej

Kolejnym rozwiązańm mogącym znacznie poprawić jakość wykonywanych pomiarów, byłoby dodatkowe urządzenie zmniejszające stężenie pary wodnej w komorze pomiarowej. Pozwoliłoby to uniknąć efektu skraplania, który znacząco zaburza wyniki pomiarów.

Urządzenie wykorzystywałoby zależność maksymalnej wilgotności bezwzględnej od temperatury. Mianowicie wraz ze spadkiem temperatury, maleje maksymalna ilość pary wodnej jaka może znajdować się w powietrzu. Na rysunku 6.7 został przedstawiony proces zmniejszania zawartości pary wodnej w powietrzu wlotowym.



Rysunek 6.7: Proces zmniejszania zawartości pary wodnej w powietrzu (opracowanie własne na podstawie [23])

Ciepłe powietrze o temperaturze około 30°C i wilgotności około 90% pochodzące z wylotu szybu wentylacyjnego jest w pierwszej kolejności ochładzane. W trakcie tego procesu część pary wodnej jest skraplana, jej zawartość zmniejsza się z poziomu około 25 g/kg do poziomu około 5 g/kg. Skroplona woda jest odprowadzana z układu, a pozbawione jej powietrze jest kierowane do komory ogrzewania, gdzie wraca do początkowej temperatury 30°C . Na tym etapie wilgotność względna wynosi już tylko 20 % i powietrze może być kierowane do komory pomiarowej.

7 Podsumowanie

W ramach pracy dokonano dokładnej analizy teoretycznej parametrów wpływających na proces przeprowadzania pomiaru przez analizator NDIR. Na jej podstawie wybrano komponenty, spośród tych dostępnych na rynku.

Przeprowadzono serię pomiarów mających na celu sprawdzenie możliwości pomiarowych przetwornika oraz ich zależność od różnych czynników, takich jak sposób podłączenia przewodów sygnałowych, temperatura pracy czy częstotliwość próbkowania. Na ich podstawie opracowano najlepszą możliwą wykonywania pomiarów oraz ich dalszego przetwarzania.

Przeprowadzono test lasera, jego zasilacza, fotodiody, wzmacniacza i kolimatora, poprzez wykonanie pomiarów przekroju wiązki. Do tego celu skonstruowano specjalne urządzenie wykonujące przesuwające fotodiodę, przy pomocy silników krokowych. Dokonano wyboru geometrii komory na podstawie przeprowadzonych testów, a następnie wydrukowano ją przy pomocy druku 3D. Zaobserwowano wpływ temperatury lasera na siłę rejestrowanego sygnału i w celu jej stabilizacji zastosowano chłodzenie przy pomocy radiatorów. Zaprojektowano układ elektroniczny mający na celu wzmacnienie efektywnej części sygnału.

Wszystkie elementy zostały ze sobą połączone oraz zamontowane w obudowie w formie przenośnej walizki. Następnie dokonano testów urządzenia na metan oraz inne czynniki zewnętrzne. Układ wskazywał zauważalne osłabienie sygnału po wprowadzeniu do komory mieszaniny o dużym stężeniu metanu, jednak obserwowe były też stosunkowo duże stałe wahania sygnału. Podczas wykonywania testów na szybie wentylacyjnym kopalni węgla kamiennego "Pniówek" osłabienie spowodowane obecnością metanu było trudno odróżnialne na tle wałań sygnału. Podczas przeprowadzania testów zaobserwowano także duży wpływ czynników mechanicznych (otwarcie pokrywy) oraz dużej wilgotności (wydychane powietrze) na rejestrowany sygnał.

Na koniec zaproponowano rozwiązań mogące poprawić jakość wykonywanych pomiarów takich jak dokładna stabilizacja temperatury czy urządzenie do ograniczania wilgotności powietrza wprowadzanego do komory.

Praca stanowi swego rodzaju bazę wiedzy i doświadczenia dotyczącego konstrukcji tego typu urządzeń. Może być bardzo przydatna dla osób chcących zająć się jego dalszym rozwojem i udoskonaleniem. Dzięki dokładnej znajomości budowy i działania może również stanowić walor edukacyjny dla studentów, którzy będą mogli na żywo zapoznać się z połączeniem i współpracą wszystkich komponentów, co nie zawsze jest możliwe w przypadku gotowych rozwiązań komercyjnych.

Literatura

- [1] Kruczkowski J., Ostrogórski P.: *Koncepcja rozproszonego systemu pomiarowego parametrów fizykochemicznych rejonu ściany w oparciu o analizę metod pomiarowych parametrów atmosfery kopalni węgla kamiennego*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków 2018.
- [2] Electro Optical Components Inc. , *Reliable and Accurate Gas Sensing using NDIR*, Stronia internetowa: <https://www.eoc-inc.com/reliable-and-accurate-gas-sensing-using-ndir/> [Data dostępu: 21.06.2023]
- [3] UNI-EXPORT, *Optyczne analizatory gazów (FTIR, NDIR, TFS)*, Stronia internetowa: <https://www.uni-export.com.pl/spektrometria-i-analiza-gazow/optyczne-analizatory-gazow-ftir-ndir-tfs/> [Data dostępu: 17.06.2023]
- [4] Jaworski B.M., Dietłaf A.A.: *Fizyka Poradnik Encyklopedyczny*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1983.
- [5] Eisberg R., Resnick R.: *Fizyka Kwantowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [6] Matusiak M., Sovoleva I.: *Zastosowanie technik laserowych w projektowaniu i wytwarzaniu odzieży*, Instytut Architektury Tekstyliów, Politechnika Łódzka 2019.
- [7] Abratkiewicz K.: *Półprzewodniki i urządzenia półprzewodnikowe*, Prezentacja z wykładu: *Fizyka współczesna* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków 2016
- [8] Duda J.: *Przetworniki ADC*, Prezentacja z wykładu: *Techniki mikroprocesorowe i systemy wbudowane* Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu
- [9] HITRAN, *Baza danych spektroskopii molekularnej HITRAN*, Stronia internetowa: <https://hitran.org> [Data dostępu: 17.05.2023]
- [10] Thorlabs, *Dokumentacja lasera FPL1059P - 1650 nm*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FPL1059P> [Data dostępu: 7.02.2023]
- [11] Thorlabs, *Dokumentacja fotodiody SM05PD5A*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD5A> [Data dostępu: 7.02.2023]
- [12] Thorlabs, *Dokumentacja kolimatora F280APC-1550*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=F280APC-1550> [Data dostępu: 7.02.2023]

- [13] Thorlabs, *Dokumentacja zwierciadła PFSQ20-03-M01*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PFSQ20-03-M01>
 [Data dostępu: 7.02.2023]
- [14] Thorlabs, *Instrukcja obsługi zasilacza IP500 - 500 mA*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=IP500>
 [Data dostępu: 7.02.2023]
- [15] GO-TRONIK, *Dokumentacja przetwornicy napięcia symetrycznego*, Stronia internetowa: <https://www.gotronik.pl/przetwornica-napiecia-symetrycznego-5v-p-7320.html>
 [Data dostępu: 12.02.2023]
- [16] Thorlabs, *Dokumentacja wzmacniacza AMP102*, Stronia internetowa: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=AMP102>
 [Data dostępu: 7.02.2023]
- [17] Botland, *Dokumentacja przetwornika ADC ADS1263 32-bit*, Stronia internetowa: <https://botland.com.pl/raspberry-pi-hat-ekspandery-wyprowadzen/19042-przetwornik-adc-ads1263-32-bit-10-kanalowy-nakladka-do-raspberry-pi-waveshare-18983-5904422371746.html> [Data dostępu: 18.05.2023]
- [18] Kamami, *Dokumentacja przetwornika ADC MCP3424 18-bit*, Stronia internetowa: <https://kamami.pl/przetworniki-ac-i-ca/563934-przetwornik-analogowo-cyfrowy-mcp3424-18-bitowy-z-i2c-dfr0316.html> [Data dostępu: 18.05.2023]
- [19] Botland, *Dokumentacja RaspberryPi*, Stronia internetowa: <https://botland.com.pl/moduly-i-zestawy-raspberry-pi-4b/14646-raspberry-pi-4-model-b-wifi-dualband-bluetooth-2gb-ram-15ghz-765756931175.html>
 [Data dostępu: 18.05.2023]
- [20] Czapliński W., Notatki własne z wykładu *Fizyka Transportu*, Kraków, AGH, 2021
- [21] Waveshare, *Dokumentacja przetwornika ADC ADS1263 32-bit*, Stronia internetowa: https://www.waveshare.com/wiki/High-Precision_AD_HAT
 [Data dostępu: 18.05.2023]
- [22] Mehta N., et al.: *Design of HMI Based on PID Control of Temperature*, International Journal of Engineering and Technical Research, Maj 2017
- [23] NCGO, *Wilgotność względna i temperatura*, Stronia internetowa: <https://ncgovote.org/pl/wilgotnosc-wzgledna-i-temperatura/>
 [Data dostępu: 14.07.2023]
- [24] Łukasz Witkowski, *Repozytorium projektu na GitHub*, Stronia internetowa: https://github.com/Ukasz-Witkowski/analizator_NDIR.git