



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

Opracowanie czujnika stężenia pyłów dla potrzeb gniazd produkcyjnych, wykorzystujących proces selektywnego topienia i spiekania laserowego

Autor: mgr inż. Stanisław Karcz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Brudnik prof. AGH  
Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Skrabalak

Praca wykonana w: Sieci Badawczej Łukasiewicza,  
Krakowski Instytut Technologiczny  
Centrum Technologii Wytwarzania

Kraków 2022



*Serdeczne Podziękowania składam wszystkim moim najbliższym, którzy wspierali mnie podczas tworzenia dysertacji.*

*Szczególne podziękowania składam Panu dr hab. inż. Andrzejowi Brudnikowi prof. AGH oraz dr inż. Grzegorzowi Skarabalakowi za okazane wsparcie i zaufanie podczas realizacji pracy doktorskiej.*

*Dziękuję wszystkim moim mentorom, kolegom oraz koleżanką za wykonane badania, analizy oraz weryfikowanie moich pomysłów.*

*Chciałbym wyrazić ogromną wdzięczność dla Pana dr hab. inż. Cezarego Worka, Pana dr hab. inż. Łukasza Śliwczyńskiego oraz Pana dr inż. Adama Czapli, za poświęcony czas oraz cenne wskazówki, które pozwoliły mi się skupić na najważniejszych problemach związanych z detekcją sygnałów optycznych.*



# Spis treści

<b>1.</b>	<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>WSTĘP .....</b>	<b>11</b>
2.1	WPROWADZENIE .....	11
2.2	CEL PRACY .....	11
2.3	TEZA PRACY .....	11
2.4	ZAKRES ZREALIZOWANYCH PRAC.....	12
2.5	AKTUALNOŚĆ PODJĘTEGO TEMATU .....	13
2.6	ORYGINALNOŚĆ ROZPRAWY.....	13
<b>3.</b>	<b>ANALIZA STANU TECHNIKI W OBSZARZE POMIARU ZAPYLENIA .....</b>	<b>14</b>
3.1	DEFINICJA PYŁU .....	17
3.2	METODY POMIARU STĘŻENIA PYŁU ZAWIESZONEGO W POWIETRZU .....	18
3.2.1	<i>Metoda wagowa .....</i>	<i>19</i>
3.2.2	<i>Analiza sitowa .....</i>	<i>21</i>
3.2.3	<i>Analiza sedymentacyjna .....</i>	<i>22</i>
3.2.4	<i>Metoda TEOM .....</i>	<i>23</i>
3.2.5	<i>Metoda indukcji elektrostatycznej.....</i>	<i>24</i>
3.3	POMIAR ZAPYLENIA METODAMI OPTYCZNYMI.....	24
3.3.1	<i>Rys historyczny .....</i>	<i>24</i>
3.3.2	<i>Metody optyczne w pomiarach cząstek .....</i>	<i>26</i>
3.3.3	<i>Pomiar zapylenia metodą dyfrakcji laserowej.....</i>	<i>29</i>
3.3.4	<i>Projekt "Sensor Community" .....</i>	<i>32</i>
3.3.5	<i>Pomiary lidarowe.....</i>	<i>34</i>
3.3.6	<i>Pomiar zapylenia w przestrzeni kosmicznej.....</i>	<i>35</i>
3.4	OKREŚLANIE ŚREDNICY CZĄSTEK .....	36
3.4.1	<i>Podział pyłu ze względu na rozmiar cząstek.....</i>	<i>38</i>
3.5	ANALIZA RYNKU URZĄDZEŃ PRZENOŚNYCH STOSOWANYCH DO CIĄGŁEGO POMIARU ZAPYLENIA.....	40
3.6	METODY ATOMIZACJI PROSZKÓW METALICZNYCH .....	42
3.6.1	<i>Atomizacja w gazie.....</i>	<i>43</i>
3.6.2	<i>Atomizacja w cieczy.....</i>	<i>45</i>
<b>4.</b>	<b>WYBRANE TECHNOLOGIE DRUKU 3D WYKORZYSTUJĄCE ŁOŻE PROSZKOWE .....</b>	<b>46</b>
4.1	TECHNOLOGIA MJF.....	47
4.2	TECHNOLOGIA BJ.....	48
4.3	TECHNOLOGIA CJP.....	50

4.4	TECHNOLOGIA EBM.....	51
4.5	TECHNOLOGIA SLS ORAZ SLM .....	52
<b>5.</b>	<b>OCHRONA PRZECIWPYŁOWA W PROCESACH ŁOŻA PROSZKOWEGO .....</b>	<b>55</b>
5.1	CZĄSTKI PROSZKU PODCZAS WYTWARZANIA PRZYROSTOWEGO .....	58
5.2	ŚRODKI BEZPIECZEŃSTWA OSOBISTEGO PRZY PROCESACH PBF.....	61
<b>6.</b>	<b>ZJAWISKA WYSTĘPUJĄCE PODCZAS POMIARU ZAPYLENIA.....</b>	<b>64</b>
6.1	ROZPRASZANIE ŚWIATŁA NA POJEDYNCZYCH CZĄSTKACH .....	64
6.2	BADANIA YOUNG'A - DYFRAKCJA FRAUNHOFERA .....	64
6.3	ROZPRASZANIE MIE.....	66
6.4	ROZPRASZANIE RAYLEIGHA .....	68
<b>7.</b>	<b>PÓŁPRZEWODNIKOWE DETEKTORY PROMIENIOWANIA .....</b>	<b>69</b>
7.1	DETEKTOR TYPU P-N .....	71
7.2	DETEKTOR TYPU P-I-N .....	71
7.3	TRYBY DZIAŁANIA DETEKTORÓW PROMIENIOWANIA .....	71
7.3.1	<i>Tryb napięciowy.....</i>	<i>72</i>
7.3.2	<i>Tryb prądowy.....</i>	<i>72</i>
<b>8.</b>	<b>ŹRÓDŁA I RODZAJE SZUMÓW W UKŁADACH ELEKTRONICZNYCH .....</b>	<b>73</b>
8.1	SZUMY TERMICZNE W REZYSTORACH .....	75
8.2	ZAKŁÓCENIA W KONDENSATORACH.....	77
8.3	WZMACNIACZ Z PRZETWARZANIEM SYGNAŁU.....	78
8.4	WYBRANE METODY DETEKCJI SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH .....	79
8.4.1	<i>Detekcja bezpośrednia .....</i>	<i>79</i>
8.4.2	<i>Układ z dynamicznym całkowaniem.....</i>	<i>80</i>
<b>9.</b>	<b>FILTRACJA SYGNAŁÓW .....</b>	<b>82</b>
9.1	FILTRY ANALOGOWE .....	82
9.1.1	<i>Filtr Bessela.....</i>	<i>82</i>
9.1.2	<i>Filtr Butterwortha.....</i>	<i>83</i>
9.2	CYFROWE ALGORYTMY FILTRACJI SYGNAŁU .....	83
9.2.1	<i>Algorytm Savitzky-Golay.....</i>	<i>83</i>
9.2.2	<i>Filtr FFT .....</i>	<i>83</i>
<b>10.</b>	<b>PRZETWORNIKI A/C W DETEKCJI SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH.....</b>	<b>85</b>
10.1	PRZETWORNIK A/C Z SUKCESYWNĄ APROKSYMACJĄ (SAR) .....	85
10.2	PRZETWORNIK TYPU FLASH.....	87

<b>11.</b>	<b>WPŁYW POSZCZEGÓLNYCH CZYNNIKÓW NA PARAMETRY SENSORA .....</b>	<b>89</b>
<b>12.</b>	<b>BADANIA WŁASNE .....</b>	<b>90</b>
12.1	BADANIA WSTĘPNE.....	90
12.2	STANOWISKO TESTOWE .....	96
12.3	ZESTAWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW .....	97
12.4	PODSUMOWANIE BADAŃ WSTĘPNYCH .....	100
<b>13.</b>	<b>OPRACOWANIE WŁASNEGO ROZWIĄZANIA.....</b>	<b>101</b>
<b>14.</b>	<b>MODEL SZUMOWY UKŁADU POMIAROWEGO.....</b>	<b>102</b>
14.1	UKŁAD WZMACNIACZA TRANSIMPEDANCYJNEGO (TIA).....	102
14.2	SZUMY TERMICZNE W UKŁADZIE TIA .....	103
14.3	SZUMY ŚRUTOWE W UKŁADZIE TIA .....	104
14.4	SZUMY NAPIĘCIOWE WZMACNIACZA OPERACYJNEGO .....	105
14.5	OKREŚLENIE MINIMALNEJ WARTOŚCI POJEMNOŚCI $C_f$ .....	105
14.6	CHARAKTERYSTYCE SZUMOWA WZMACNIACZA TIA .....	106
14.7	CAŁKOWITE SZUMY W UKŁADZIE WZMACNIACZA TIA .....	108
14.8	UKŁAD WZMACNIACZA NIEODWRACAJĄCEGO .....	109
14.9	CAŁKOWITE SZUMY W UKŁADZIE WZMACNIACZA NIEODWRACAJĄCEGO.....	111
14.10	ANALIZA SZUMOWA UKŁADU PRZEDWZMACNIACZA W OPROGRAMOWANIU LTSPICE XVII.....	112
<b>15.</b>	<b>ROZWIĄZANIE WYKORZYSTUJĄCE WZMACNIACZ BEZ PRZETWARZANIA .....</b>	<b>115</b>
15.1	PROJEKT ORAZ WYKONANIE KOMORY POMIAROWEJ SENSORA .....	115
15.2	WARUNKI EKSPERYMENTU DLA AUTORSKIEGO SENSORA ZAPYLENIA .....	118
15.3	UKŁAD ELEKTRONICZNY ORAZ REJESTRACJA IMPULSÓW .....	119
15.4	WSTĘPNY DOBÓR WZMOCNIENIA UKŁADU.....	121
15.5	SYNTEZA CYFROWA WYBRANYCH FILTRÓW (DSP) .....	123
15.6	POMIAR SZUMÓW W UKŁADZIE DETEKTORA BEZ PRZETWARZANIA .....	126
15.7	ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW .....	127
<b>16.</b>	<b>ROZWIĄZANIE WYKORZYSTUJĄCE WZMACNIACZ Z PRZETWARZANIEM.....</b>	<b>131</b>
16.1	MODYFIKACJE DETEKTORA .....	131
16.2	ANALIZA FFT SYGNAŁU Z DETEKTORA Z PRZETWARZANIEM.....	133
16.3	POMIAR SZUMÓW W UKŁADZIE DETEKTORA Z PRZETWARZANIEM .....	133
16.4	ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW .....	135
16.5	PORÓWNIANIE OTRZYMANYCH WYNIKÓW .....	136
16.6	WYZNACZENIE STĘŻENIA MASOWEGO ZAPYLENIA .....	139
16.7	DETEKCJA I ELIMINACJA BŁĘDÓW POMIAROWYCH .....	140

<b>17.</b>	<b>KOŃCOWA IMPLEMENTACJA ROZWIĄZANIA .....</b>	<b>143</b>
17.1	IMPLEMENTACJA SPRZĘTOWA FILTRU BESSELA 8 RZĘDU .....	143
17.2	SPRZĘTOWA DETEKcja IMPULSÓW .....	147
17.3	TOPOLOGIA ZASTOSOWANEGO ROZWIĄZANIA .....	148
17.4	ODPOWIEDŹ UKŁADU NA SUBMIKRONOWE NIESFERYCZNE PROSZKI.....	150
<b>18.</b>	<b>WNIOSKI KOŃCOWE.....</b>	<b>152</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>154</b>



# 1. Streszczenie

Celem rozprawy doktorskiej (doktorat wdrożeniowy) było opracowanie dedykowanego urządzenia umożliwiającego pomiar zapylenia w procesach wytwarzania przyrostowego, a w szczególności w procesie selektywnego topienia / spiekania laserowego (SLS/SLM).

W pracy przedstawiono informację o obecnych trendach w obszarze wytwarzania przyrostowego oraz stosowanych środkach ochrony bezpośredniej.

Przedstawiona rozprawa analizuje złożone zjawiska fizyczne zachodzące w trakcie pomiaru zapylenia metodą dyfrakcji laserowej oraz przedstawia sposoby eliminacji zjawisk niekorzystnie wpływających na pomiar, odnosząc otrzymane wyniki do referencyjnej metody wagowej. Realizacja tego zagadnienia obejmuje analizę dostępnych rozwiązań na rynku oraz opracowanie od podstaw dedykowanego rozwiązania (czujnika) dla cząstek o znacznych gęstościach.

Analiza zagadnienia obejmuje:

- Badania materiału używanego w procesie selektywnego topienia / spiekania laserowego
- Zaprojektowanie kształtu komory detektora oraz określenie prędkości przepływu za pomocą analizy CFD
- Cyfrową syntezę sygnałów w celu określenia najbardziej optymalnego sposobu filtracji dla sygnału z detektora promieniowania
- Dobór oraz zaprojektowanie toru detektora wraz ze znaczną eliminacją szumów 1/f
- Implementację sprzętową rozwiązania oraz kalibrację sensora do danego materiału
- Opracowanie platformy webowej do akwizycji oraz wizualizacji danych

Brak szczegółowych informacji na temat przetwarzania sygnałów optycznych w kontekście pomiaru zapylenia, spowodowały konieczność stworzenia w tym celu autorskich narzędzi oraz dedykowanego stanowiska pomiarowego, co było złożonym zadaniem.

# Abstract

This PhD thesis (under the title “Development of a dust concentration sensor for production cells using the process selective melting and laser sintering”) was to design a dedicated device to measure dust in additive manufacturing processes, specifically considering the selective laser sintering and the selective laser melting (SLS/SLM).

The thesis presents information of current trends in the field of additive manufacturing and direct protection measures in this area.

The presented dissertation analyses the complex physical phenomena which takes place during the dust measurement using the laser diffraction method and the ways to eliminate the phenomena, which adversely affects the measurement. Subsequently, referring the obtained results to the reference weighing method. The implementation of this issue includes the analysis of available commercial solutions and the development of a dedicated design from scratch for use with particles of significant density.

The analysis of the subject included:

- Testing the material used in the selective melting / laser sintering process.
- The design of the detector chamber’s shape and determination of the velocity flow using CFD analysis.
- Digital signal processing signals to determine the most optimal filtering method for the radiation’s detector signal.
- Selection and the design of the detector’s path, including significant elimination of 1/f noises.
- Hardware implementation of the solution and calibration of the sensor the given material.
- Development of a web-based platform for data acquisition and visualization.

The lack of detailed information on the processing of optical signals in the context of dust measurement made it necessary to create proprietary tools and a dedicated measurement stand for this purpose. The complexity of the design and mentioned factors combined made this issue a complex task.

## **2. Wstęp**

### **2.1 Wprowadzenie**

Ciągły rozwój technologii przyrostowych oraz rozpowszechnianie się technologii łoża proszkowego w wielu obszarach powodują opracowywanie nowych technologii wytwarzania oraz nowych materiałów które mogą być używane w takich procesach. Największą dowolność kształtowania dają procesy formowania przyrostowego, gdzie materiał wsadowy jest w postaci proszku. Największa dowolność kształtowania implikuje najbardziej skomplikowane sposoby przetwarzania materiału, a co za tym idzie możliwość wielokrotnego kontaktu operatora z materiałem.

Obecnie nie jest wymagany ciągły pomiaru zapylenia na danym stanowisku pracy i nie istnieją osobne regulacje prawne w temacie zapylenia przy urządzeniach do formowania przyrostowego.

Komercyjnie dostępne sensory wykorzystujące zjawisko dyfrakcji laserowej dostosowane do zakresu uziarnienia materiałów stosowanych w procesach łoża proszkowego nie specyfikują maksymalnej gęstości zasysanego materiału oraz nie odnoszą się do żadnej referencyjnej metody wagowej.

### **2.2 Cel pracy**

Celem pracy było opracowanie innowacyjnego sensora dedykowanego do pomiaru zapylenia przy procesach łoża proszkowo, z szczególnym uwzględnieniem procesu SLS/SLM oraz proszków o dużych gęstościach. Pozwoli to na szerokie zastosowanie i podniesienie bezpieczeństwa pracowników pracujących przy procesach selektywnego topienia / spiekania laserowego.

### **2.3 Teza pracy**

Z analizy literatury opisującej współczesne kierunki rozwoju technologii przyrostowych wynika, iż z popularyzacją danej technologii związany jest wzrost ilości badań

prowadzonych w kierunku oddziaływania szkodliwych czynników powstających w owych procesach na zdrowie i życie operatorów.

W przypadku technologii łoża proszkowego jest to stężenie zapylenia w powietrzu, którym oddychają pracownicy podczas przygotowania materiału oraz obróbki wykańczającej otrzymanych detali.

Aby móc zwiększyć ochronę pracowników lub zrealizować systemy wczesnego ostrzegania potrzebne są rozwiązania monitorujące w trybie ciągłym stężenie szkodliwego czynnika. Otrzymane wyniki powinny być odniesione do uznanych metod pomiarowych.

**W związku z tym można postawić tezę iż:**

*Możliwe jest opracowanie niskokosztowego sensora zapylenia pracującego w trybie ciągłym, dedykowanego do procesów łoża proszkowego, którego wskazania są tożsame z uznaną metodą wagową.*

## **2.4 Zakres zrealizowanych prac**

W pracy przedstawiono wyniki badań prowadzonych w Sieci Badawczej Łukasiewicza Krakowskiego Instytutu Technologicznego, mających na celu podnoszenie kwalifikacji pracowników pionu badawczego.

Opracowanie dedykowanego rozwiązania przedstawionego w pracy wymagało przeprowadzenia od podstaw wielu badań i prac aplikacyjnych.

Na podstawie analizy literatury oraz wymagań technicznych postawionych finalnemu rozwiązaniu zbudowano stanowisko badawcze przeznaczone do testów komercyjnych czujników oraz później autorskiego rozwiązania.

Całość projektu realizowana była przez zespół badawczy w Łukasiewiczu (Krakowskim Instytucie Technologicznym), którym to zespołem w ramach subwencji miałem zaszczyt i przyjemność kierować, pełniąc rolę głównego konstruktora, kierownika oraz koordynatora merytorycznego projektu.

W przypadku wysoko specjalistycznych zagadnień w dziedzinie elektroniki konsultacje odbywałem z promotorem pracy doktorskiej oraz z innymi pracownikami wydziału

Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, za co chciałbym wszystkim serdecznie podziękować.

## 2.5 Aktualność podjętego tematu

Temat pracy jest ściśle związany z rosnącą popularnością technologii przyrostowych wykorzystujących materiał budulcowy w postaci proszku (technologie łoża proszkowego *powder bed fusion*, PBF). Technologie PBF stają się coraz bardziej atrakcyjną alternatywą w obszarze wytwarzania złożonych geometrii oraz kanałów konformalnych, głównie dzięki znacznie większym możliwościom niż w przypadku wytwarzania konwencjonalnego.

Zakres doktoratu odpowiada potrzebom Sieci Badawczej Łukasiewicza Krakowskiego Instytutu Technologicznego.

Przeprowadzone badania były zgodne (na czas rozpoczęcia realizacji pracy doktorskiej – tzn. rok 2018) z krajowymi inteligentnymi specjalizacjami, a zwłaszcza z :

- KIS 14.IV.9 – Sieci sensorowe do monitorowania stanu środowiska człowieka
- KIS 17.I.1 – Inteligentne systemy bezpieczeństwa systemów zautomatyzowanych oraz robotów;
- KIS 17.II.5 – Metody, narzędzia, oprzyrządowanie, materiały i procesy związane z technologią przyrostową
- KIS 18.IV.1 – Rozwiązania optoelektroniczne w procesach wytwarzania przyrostowego.

## 2.6 Oryginalność rozprawy

Oryginalność niniejszej rozprawy polega na tym iż:

W czasie opracowywania pracy doktorskiej nie posiadano lub były nieznane informacje o podobnych zrealizowanych projektach dedykowanych do pomiaru zapylenia przy procesach kształtowania przyrostowego dla proszków o znacznych gęstościach.

### 3. Analiza stanu techniki w obszarze pomiaru zapylenia

Czołową instytucją prowadzącą badania w zakresie występowania szkodliwych czynników na stanowiskach pracy oraz bezpieczeństwa pracowników w Polsce jest Centralny Instytut Ochrony Pracy (CIOP). Nie ma odrębnych wymagań dotyczących urządzeń do formowania przyrostowego, ani też specjalistycznych rozwiązań do pomiarów zapylenia przy procesach druku 3D. Istnieje niewielka ilość publikacji odnośnie występowania drobnych cząstek metali w przestrzeni roboczej w przypadku procesów formowania przyrostowego [1], oraz analizy jakości powietrza przy tych procesach [2].

Norma PN-EN 4225:1999 [3] oraz Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r (w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [4]) określa wstępnie niekorzystne czynniki, na które mogą być narażeni operatorzy w trakcie procesów formowania przyrostowego, w których wykorzystywane są proszki metaliczne.

Ustawa nie podaje wprost nazw materiałów stosowanych do formowania przyrostowego metodą selektywnego topienia/spiekania laserowego (*SLS/SLM selective laser sintering / melting*) takich jak: stal nierdzewna, stopy aluminium i tytanu oraz brązu. Z szkodliwych związków wchodzących w skład stali nierdzewnej za najbardziej istotne można uznać stężenia tlenków żelaza ( $5 \text{ mg/m}^3$ ), chromu metalicznego ( $0,5 \text{ mg/m}^3$ ), niklu ( $0,25 \text{ mg/m}^3$ ) oraz molibdenu ( $4 \text{ mg/m}^3$ ). W przypadku stopów aluminium kluczowym składnikiem jest glin, a jego maksymalne dopuszczalne stężenie podczas ośmiogodzinnej zmiany roboczej wynosi  $2,5 \text{ mg/m}^3$ . W przypadku brązów maksymalne dopuszczalne stężenie miedzi oraz jej związków to  $0,2 \text{ mg/m}^3$ . Graniczne wartości nie przekraczają  $5 \text{ mg/m}^3$  przy ośmiogodzinnej zmianie pracy. Drugim dokumentem, w którym wskazuje się dopuszczalne poziomy niklu to dyrektywa unii europejskiej o numerze 2004/107/EC [5].

Proces selektywnego spiekania topienia laserowego (SLS) polega na nanoszeniu warstw proszku metalicznego lub polimerowego, a następnie jego spiekaniu lub topieniu przy użyciu lasera. Na skutek konsolidacji warstw i obniżania się platformy roboczej

powstaje obiekt trójwymiarowy, znajdujący się w objętości proszku. Proszki metaliczne do procesu SLM otrzymywane są drogą atomizacji [6] i posiadają kształt sferoidalny [7]. Proszki polimerowe, otrzymywane w procesie pulweryzacji, nie posiadają kształtu zbliżonego do sferoidalnego [8].

Stosowane dyrektywy oraz rozporządzenia regulują poziomy szkodliwych związków w środowisku pracy. Nie zdefiniowano jednak oddzielnie poziomów stężeń szkodliwych substancji występujących przy procesach łoża proszkowego (*PBF – Powder Bed Fusion*) [9]. Interesującym jest fakt, iż pod wpływem rosnącej popularności technologii FDM (*Fused Deposition Modeling*) w roku 2016 oraz 2017 opublikowano badania na temat stężenia lotnych związków organicznych (*VOC – Volatile Organic Compounds*) podczas procesu FDM [10–12]. Wnioski z badań są istotne, szczególnie biorąc pod uwagę, iż niskobudżetowe drukarki typu 3D open frame (bez zabudowy, z otwartą komorą roboczą) zaczęły pojawiać w przestrzeniach powszechnego użytku. W roku 2018 pracownicy Georgia Institute of Technology opublikowali wyniki dwuletnich badań [13,14] dające podstawy do opracowania normy ANSI/CAN/UL 2904 [15] przez organizację UL Chemical Safety.

Norma ANSI/CAN/UL 2904 zawiera m.in. metody pomiaru i oceny emisji cząstek stałych i lotnych substancji chemicznych z różnych drukarek 3D. Norma ta ma zastosowanie do wolnostojących drukarek 3D, które zazwyczaj znajdują się w szkołach, biurach, bibliotekach, domach i innych nieprzemysłowych pomieszczeniach zamkniętych. Według zaleceń Chemical Safety norma powinna być stosowana w celu zmniejszenia zagrożeń związanych z zanieczyszczeniem powietrza w pomieszczeniach zawierających drukarki 3D.

Wyżej wymieniony temat staje się aktualnym i jest istotnym czynnikiem podczas eksploatacji drukarek w technologii FDM [16]. Badania nad lotnymi związkami organicznymi są prowadzone również w dziedzinie innych technologii formowania przyrostowego, np. w procesach DLP/SLA (*Digital Light Processing / stereolitography*), gdzie wykorzystuje się żywice światłoutwardzalne. W przypadku technologii DLP/SLA, dzięki bardziej kompaktowej budowie i konieczności izolowania żywicy od światła zewnętrznego, łatwo można stosować filtry pochłaniające VOC. Przykładem drukarki w technologii DLP, posiadającej filtr jest np. 3D Zortrax Inkspire.

W niektórych drukarkach 3D, z zamkniętą komorą roboczą (przeznaczonych do przetwarzania materiałów o dużym współczynniku skurczy, np. ABS) również stosuje się

filtry pochłaniające opary, ale są one obecnie rzadkością. Przykładem drukarki w technologii FDM z zastosowanym filtrem HEPA jest np. drukarka Flashforge Adventurer 4.

Można zauważyć, że wraz z upowszechnianiem się danej technologii wytwarzania przyrostowego świadomość na temat ściśle związanych z procesem jej użytkowania szkodliwych czynników wzrasta. Podobnie w technologiach łoża proszkowego.

Jak donosi branżowy portal „Centrum druku 3D” w swoim artykule z 14 października 2020r. „3dpbm, wydawca wiodącego brytyjskiego portalu o druku 3D 3dprintingmedia.network, opublikował wyniki analizy rynku wytwarzania addytywnego kompozytów. W kompleksowym badaniu Composites AM 2020 – 2030, przeprowadzonym w II i III kwartale 2020 r. wzięło udział 50 firm zajmujących się technologiami przyrostowymi. Zestawienie pozwoliło na zebranie informacji o sprzedaży i działalności biznesowej największych przedsiębiorstw działających w tej branży. 3dpbm szacuje, że całkowity rynek druku 3D kompozytów (w tym materiały eksploatacyjne, sprzęt, usługi i zastosowania) wzrośnie z 480 mln USD w 2020 roku do ponad 10,6 mld USD do końca 2030 roku.” [17–19] . Oznacza to iż technologie PBF znajdują ciągle zastosowanie i mogą być alternatywą dla konwencjonalnych metod wytwarzania.

Mając na uwadze, iż technologie PBF dają największą dowolność kształtowania i pozwalają na tworzenie kompozytów metalicznych, ceramicznych oraz na bazie polimerów, mogą być one zastosowane w bardzo wyspecjalizowanych aplikacjach.

Różne metody pomiarowe wymagają odmiennych rozwiązań technicznych w zależności od stopnia skomplikowania oraz od wymaganej dokładności pomiarowej. Producenci półprzewodników przygotowali kilka dedykowanych rozwiązań z zakresu pomiaru zapylenia oraz spektroskopii, które mogą być podstawą do opracowania własnych rozwiązań.

Firma Texas Instruments w dokumencie „Texas Instruments Optical Front-End System Reference Design“ [20] prezentuje algorytm działania oraz procedurę kalibracyjną dla sensora zapylenia przeznaczonego do pyłu PM2.5. W zaproponowanym rozwiązaniu zastosowano diodę LED emitującą promieniowanie w paśmie podczerwonym. Dokumentacja techniczna o tytule „Optical Front-End System Reference Design” [21] prezentuje układ detektora optycznego przeznaczonego do sygnałów szybkozmiennych mogących znaleźć zastosowanie między innymi w skanerach 3D, a także w układach widzenia maszynowego .

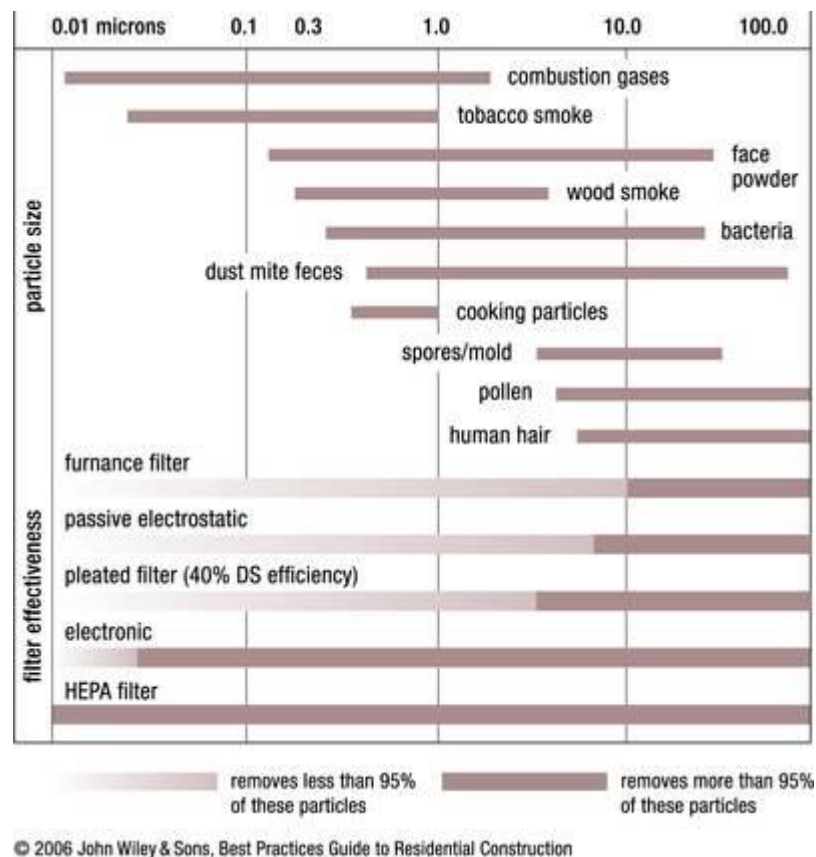


Dokument opublikowany przez firmę Analog Devices [22] prezentuje zestaw uruchomieniowy CN0503, przeznaczony do pomiaru właściwości substancji w stanie ciekłym. Zestaw pozwala na pomiar optyczny fluorescencji, wartości pH oraz mętności. W dokumentacji przedstawiono zarys teoretyczny, sprzętowe rozwiązania oraz sposób interpretacji pomiarów.

Przechodząc do przeglądu uznanych metod pomiarowych stosowanych w ocenie jakości powietrza warto odpowiedzieć sobie na pytanie czym jest pył.

### 3.1 Definicja pyłu

Jak określa norma PN-EN 4225:1999 [23] „Pył to cząstki ciała stałego różnej wielkości i pochodzenia pozostające przez pewien czas w zawieszeniu w gazie”. Rozmiary poszczególnych przykładowych cząsteczek pyłu przedstawia Rys. 3-1.



Rys. 3-1 Przykładowe wielkości cząsteczek pyłu [10]

Mając na uwadze to, że pył może mieć różnorakie rozmiary i kształty oraz pochodzić z różnych źródeł, stworzono kilka powszechnie stosowanych metod pomiarowych.

### 3.2 Metody pomiaru stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu

Pomiary stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu atmosferycznym można podzielić na następujące metody:

- manualne,
- automatyczne.

Z uwagi na zasadę działania, można je również podzielić na:

- bezpośrednie,
- pośrednie.

Przy wykonywaniu pomiarów manualnych stosowana jest metoda reflektometryczna, polegająca na zaczernieniu bibuły filtracyjnej po przepuszczeniu przez nią określonej objętości badanego powietrza.

Drugą metodą stosowaną w pomiarach manualnych jest metoda wagowa. Pomiary automatyczne wykonywane są za pomocą analizatorów stacjonarnych w stacjach pomiarowych lub ambulansach pomiarowych imisji.

Metody bezpośrednie pomiaru zapylenia polegają na pobraniu pyłu zawartego w objętości badanego powietrza, a następnie wykorzystaniu takich zjawisk jak:

- sedimentacja (konimetry),
- termodyfuzja (pyłomierze termodyfuzyjne),

oraz filtracyjne (filtry miernicze), i określeniu jego ilości.

W pyłomierzach pracujących w sposób pośredni dla określenia zawartości pyłu w powietrzu wykorzystuje się wtórne zjawiska wywołane przez pył:

- absorpcję lub rozproszenie światła,
- spadek napięcia elektrycznego,
- osłabienie wiązki promieniowania beta przez masę osadzonego pyłu,
- zmianę częstości drgań elementu sprężystego pod wpływem zmiany masy osadzonego na filtrze pyłu, itp. [24].

Istnieje kilka metod pomiaru zapylenia oraz analizy wielkości ziaren, do najczęściej wykorzystywanych należą m.in.:

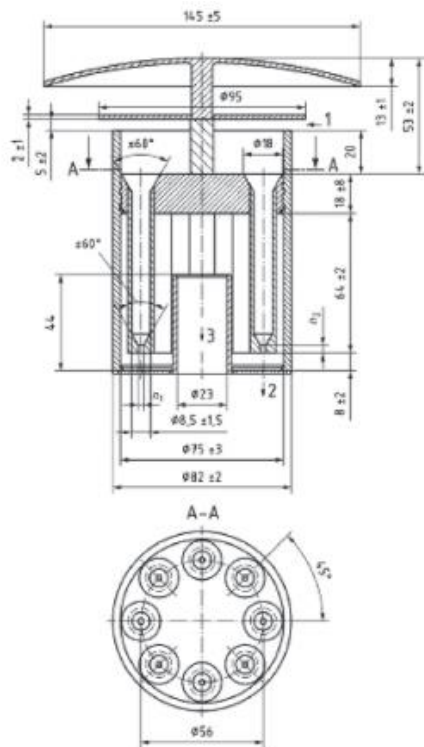
- metoda wagowa,
- analiza sitowa,
- zastosowanie wagi sedymentacyjnej
- metoda TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*),
- metoda indukcji elektrostatycznej,
- dyfrakcja laserowa.

Każda z wymienionych metod posiada swoje wady, zalety oraz ograniczenia.

W dalszej części pracy została podana ich krótka charakterystyka.

### 3.2.1 Metoda wagowa

W metodzie wagowej przy pomocy poborników zbierane są próbki w czasie 24 godzin, a następnie ważone zgodnie z normą PN-EN 12341:2014-07 [25]. Schemat budowy pobornika zgodnie z normą PN-EN 12341:2006 [26] przedstawiono na Rys. 3-2.



Wszystkie wymiary podano w mm. Tolerancja wszystkich wymiarów podanych bez tolerancji wynosi odpowiednio:  $\pm 0,2$  mm lub  $\pm 0,5^\circ$

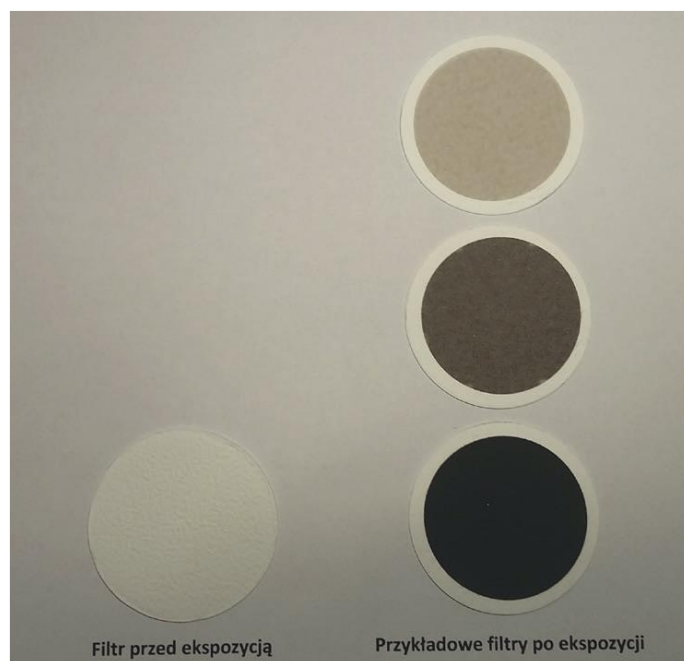
1. Pobór powietrza
2. Odwodnienie dla impaktora wody
3. Przepływ do filtra

- n1 Wewnętrzna średnica dyszy:  
dla PM<sub>2,5</sub> 2,6 ± tolerancja wykonania  
dla PM<sub>10</sub> 6,5 ± tolerancja wykonania
- n2 Długość dyszy:  
dla PM<sub>2,5</sub> 3,7 ± 0,1  
dla PM<sub>10</sub> 7,0 ± 0,1

Rys. 3-2 Przekrój oraz zdjęcie poglądowe głowicy poboru dla pyłu PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> dla przepływu 2,3 m<sup>3</sup>/h Źródło: PN-EN 12341:2014 [26] (zdjęcie: T. Frączkowski)

W metodzie wagowej można stosować różne filtry, o minimalnej wielkości oczka wynoszącej 0,01  $\mu\text{m}$ . Filtry te zazwyczaj wykonane są z celulozy, włókna szklanego,

włókna kwarcowego, PTFE lub PTFE pokrytego włóknem szklanym. W pomiarach prowadzonych przez Państwowy Monitoring Środowiska przyjęto do stosowania filtry kwarcowe [26].



Rys. 3-3 Przykłady filtrów stosowanych do pomiaru metodą wagową z włókna kwarcowego przed i po ekspozycji [27]

Kluczowe czynniki, które mogą mieć wpływ na otrzymywane wyniki to [27]:

- różnice w projektowaniu i budowie głowic separacyjnych poborników
- wartość prędkości przepływu próbki,
- straty osadzania pyłu w kanale pomiędzy wlotem a filtrem,
- niekontrolowane straty w rurze pomiędzy wlotem a filtrem oraz na filtrze, ze względu na parowanie wody i pół-lotnych cząstek pyłu,
- naddatek lub strata materiału spowodowane elektrycznością statyczną.

Dla zwiększenia dokładności pomiaru, ilość wydzielonego na filtrze pyłu powinna wynosić co najmniej 50 mg. W praktyce oznacza to dużą ilość powietrza do pobrania oraz do przefiltrowania (0,3-130 m<sup>3</sup>/h). Dodatkowo należy wysuszyć filtr do uzyskania stałej masy oraz wyznaczyć jego masę z dokładnością  $\pm 0,1$  mg.

Metoda wagowa jest stosowana w przemyśle górniczym, hutniczym oraz powszechnie jako sposób oceny jakości powietrza. Pomiary metodą grawimetryczną wykonuje się

stacjach monitorowania jakości powietrza. Jest ona traktowana jako metoda referencyjna w stosunku do innych metod pomiarowych.

### 3.2.2 Analiza sitowa

Analiza sitowa polega zazwyczaj na przesiewaniu 100 g proszku przez zestaw sit, określeniu masy i udziałów procentowych poszczególnych frakcji oraz wyznaczeniu wartości rzeczywistych, krzywej kumulacyjnej i histogramu wartości standardowej.

W analizie sitowej standardowo przyjmuje się następującą wielkość sit: 180, 150, 106, 75, 63 oraz 45  $\mu\text{m}$ , przy czym sita o wielkości oczek powyżej 45  $\mu\text{m}$  otrzymuje się poprzez tkanie, a o mniejszych oczkach drogą trawienia [28]. Analiza sitowa wykonywana jest zgodnie z normą PN-EN ISO 4497:2020-11 [29].

Analizę sitową można prowadzić na sucho (dla materiałów nie zawierających grudek) oraz na mokro (dla materiałów zawierających gródki, jak również dla materiałów zawierających bardzo dużą ilość ziaren czy mających tendencje do pylenia). Analiza sitowa umożliwia określenie wielkości poszczególnych ziaren oraz udziału procentowego poszczególnych frakcji. Czas analizy wynosi od kilku do kilkunastu minut i nie nadaje się do pomiarów ciągłych, ponieważ objętość proszku do analizy jest stosunkowo duża. Przykładowe urządzenie przeznaczone do analizy sitowej przedstawiono na Rys. 3-4.

Analiza sitowa wykorzystywana jest w przemyśle jako kontrolna metoda pomiarowa w procesie otrzymywania proszków oraz oceny ich jakości. Dodatkowo tę metodę wykorzystuje się w geologii inżynierskiej i geotechnice. W hydrogeologii stosowana jest ona do określenia niektórych właściwości gruntów. Analiza sitowa, dzięki zastosowaniu sit o zróżnicowanej wielkości oczek, jest metodą uniwersalną.



Rys. 3-4 Wibracyjna wstrząsarka sitowa „Spartan” – do metody mokrej i suchej (zakres stosowania do pyłów o wielkości ziaren z przedziału 20  $\mu\text{m}$  do 2500  $\mu\text{m}$ ) [30]

W analizie sitowej stosuje się zazwyczaj sita tkane, o kwadratowym kształcie oczek. W przypadku proszków o małym uziarnieniu ziarna mogą powodować zatykanie się sit, a co za tym idzie zwiększanie błędów pomiarowych spowodowanych startami materiału pozostałego na sitach.

### 3.2.3 Analiza sedymentacyjna

Określenie wielkości cząstek proszku metodą sedymentacyjną stosuje się zazwyczaj dla proszków o wielkości cząstek poniżej 45  $\mu\text{m}$  (w praktyce można wykonywać również analizy dla większych cząstek). Podczas badania wykorzystuje się zjawisko opadania cząstek (najczęściej w cieczy) – tzw. zjawisko sedymentacji. Podczas tego procesu cząstka początkowo opada ruchem przyspieszonym, a następnie wolniej, gdyż wraz ze zwiększeniem prędkości opadania wzrastają opory ruchu. Cząstki opadają do momentu ustalenia się równowagi między siłą ciężkości, a siłą oporu ośrodka. Od tej chwili cząstki poruszają się ruchem jednostajnym. Wiadomym jest również (z prawa Stokesa), że im większe (cięższe) są cząstki proszku, tym większa jest szybkość ich opadania w cieczy sedymentacyjnej. Ruch cząstki w cieczy w warunkach równowagi uzależniony jest od liczby Reynoldsa ( $Re$ ) oraz współczynnika oporu ( $\lambda$ ). Za pomocą liczby Reynoldsa można oszacować stosunek sił bezwładności do sił lepkości. Wartość ta stanowi kryterium do wyznaczania charakterystyki przepływu wszelkich płynów nieściśliwych.

W badaniach rozkładu wielkości cząstek korzysta się najczęściej z równań opisujących laminarny ruch cząstek w lepkiej cieczy. Stokes założył, że jeśli opadająca cząstka kulista w lepkiej cieczy porusza się ze stałą prędkością w nieskończenie dużym zbiorniku, to siła oporu działająca na tę cząstkę wynika jedynie z lepkości cieczy. Jest to tzw. prawo Stokesa [31].

Badanie rozkładu wielkości cząstek proszków metodą sedymentacyjną przeprowadza się przy wykorzystaniu [28]:

- pipety Andreasena,
- wagi sedymentacyjnej,
- metody dyfrakcyjnej,
- przepływu prądu elektrycznego.

Metoda sedymentacyjna nie nadaje się do pomiarów ciągłych w środowisku przemysłowym, ze względu na sposób przygotowania próbek, który może być problematyczny w środowisku produkcyjnym.

Metoda sedymentacyjna stosowana jest powszechnie w przemyśle farmaceutycznym i medycznym do kontroli czystości mikrobiologicznej. Metodę sedymentacyjną można również stosować w przetwórstwie materiałów proszkowych do oceny ziarnistości lub procentowego udziału poszczególnych frakcji.

### 3.2.4 Metoda TEOM

Metoda TEOM (*Traped Element Oscillating Microbalance*) jest jedną z nielicznych metod możliwą do stosowania przy pomiarach zapylenia w sposób ciągły. System pomiarowy metody TEOM wyposażony jest w pompę zasysającą system kondycjonujący próbki powietrza oraz filtry. Istota działania systemu polega na zmianie częstotliwości drgań szklanej rurki, która jest najważniejszym elementem zestawu pomiarowego (obecność pyłu zmienia częstotliwość drgań rurki). Urządzenia wykorzystujące TEOM są zazwyczaj do użytku stacjonarnego, spotyka się także rozwiązania przenośne.

Na Rys. 3-5 przedstawiono przykładowe urządzenie wykorzystujące metodę TEOM do pomiaru zapylenia.



Rys. 3-5 Urządzenia wykorzystujące metodę TEOM [32]

Metoda TEOM powszechnie stosowana jest do pomiaru jakości powietrza jako jedna z ciągłych metod pomiaru zapylenia. Wadą tego typu urządzeń są duże rozmiary instalacji oraz wysokie koszty. Metoda TEOM zbliżona jest do zasady działania mikrowagi kwarcowej, (*Quartz Crystal Microbalance*, QCM lub QMB) [33].

### 3.2.5 Metoda indukcji elektrostatycznej

Inną metodą powszechnie stosowaną do pomiarów stężenia zapylenia, głównie w procesach przemysłowych, jest metoda wykorzystująca zjawisko indukcji elektrostatycznej. Czujnik zapylenia zazwyczaj jest elementem automatyki przemysłowej.

Cząsteczki pyłu przelatujące w pobliżu sondy przetwornika powodują wytworzenie wewnątrz niej ładunku, jest to tzw. ładunek indukowany. Ładunek jest proporcjonalny do ilości cząsteczek pyłu [34]. Na Rys. 3-6 przedstawiono przykładowy pyłomierz działający na zasadzie indukcji elektrostatycznej.

Mierniki zapylenia oparte na zjawisku indukcji elektrostatycznej wykorzystywane są głównie w kanałach wentylacyjnych i kominach, gdzie występują cząstki o stosunkowo dużych rozmiarach np. w przewodach wentylacyjnych odprowadzających powietrze z procesów laserowych.



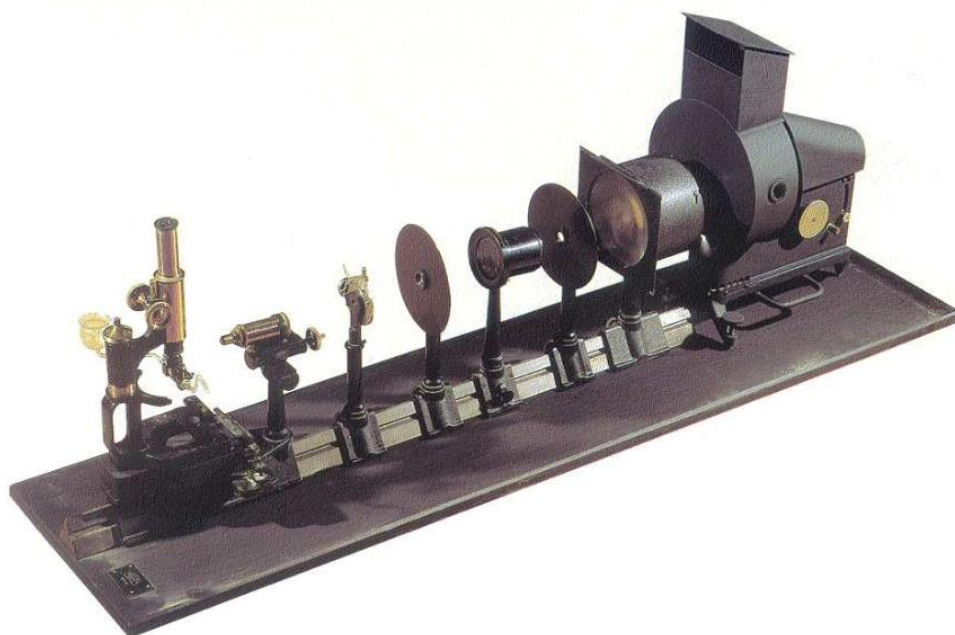
Rys. 3-6 Pyłomierz działający na zasadzie indukcji elektrostatycznej PMT2 [8]

## 3.3 Pomiar zapylenia metodami optycznymi

### 3.3.1 Rys historyczny

Historia badań oraz analizy optycznej cząstek rozpoczyna się w roku 1914, kiedy niemiecki badacz Richard Zsigmondy (laureat Nagrody Nobla w dziedzinie chemii w 1925 r.) opracował przyrząd do obserwacji światła rozproszonego przez małe cząsteczki. Opracowany przyrząd, nazwany „ultramikroskopem” (Rys. 3-7) [35], pozwalał na obserwację cząstek w ciemnym polu.





*Rys. 3-7 Zdjęcie ultramikroskopu (wydział farmaceutyczny Uniwersytetu w Granadzie - Muzeum Instrumentów Naukowych im. Jesús Thomas Gomez'a) [36]*

Od tego czasu badania i zastosowanie ultramikroskopu stały się ważne w badaniu koloidów, hydrozoli, toksykologii i in. Wszędzie, gdzie cząstki mikro i submikronowe odgrywają istotną rolę.

Wiedza zdobyta podczas badań z aerozolami oraz hydrozolami była intensywnie poszerzana. Rozwój technik detekcji promieniowania optycznego oraz wprowadzenie nowych materiałów używanych w detektorach promieniowania pozwoliły na gwałtowny rozwój dziedziny, jaką jest obecnie optoelektronika [37].

Przełomowym wynalazkiem w dziedzinie analizy aerozoli oraz hydrozoli było opracowanie masera przez Charlesa Townesa, Aleksandra Prochorowa i Nikołaja Basowa (za co otrzymali Nagrodę Nobla z dziedziny fizyki w 1964 r.) oraz opracowanie pierwszego działającego lasera rubinowego przez Theodora Maimana 1960 r.

Wspólną cechą pomiarów wykonywanych metodą optyczną jest możliwość bezkontaktowych pomiarów w czasie rzeczywistym, o wysokiej dokładności. Ponieważ nośnikiem informacji w danym przypadku jest światło, pomiar może być wykonywany z pewnej odległości od próbki i nie jest konieczna ingerencja w ośrodek, w którym znajdują się cząstki.

Dodatkową zaletą metod optycznych jest możliwość jednoczesnego określania wielu parametrów na podstawie jednego pomiaru [38].

### 3.3.2 Metody optyczne w pomiarach cząstek

Fala świetlna ulega rozproszeniu, ponieważ w danym ośrodku może występować wiele czynników powodujących zakłócenia.

Zakłócenia w rozchodzeniu się fali mogą być spowodowane:

- fluktuacją izobaryczną – różnicą ciśnień w danym ośrodku,
- fluktuacją adiabatyczną – wywołaną przez ciśnienie, które rozchodzi się za pośrednictwem fali sprężystej (na przykład fali akustycznej),
- fluktuacją anizotropii – różnych właściwości ośrodka w różnych kierunkach rozchodzenia się fali,
- fluktuacją stężenia – spowodowaną przez cząstki zawieszone w powietrzu lub cieczy, o właściwościach optycznych innych niż otaczający go ośrodek.

Ponieważ wiązka światła podczas pomiarów podlega wymienionym wyżej zjawiskom w objętości powietrza lub cieczy, zostanie rozproszona we wszystkich kierunkach. Wszystkie wymienione rodzaje zakłóceń nie są spowodowane ruchem cząsteczek, z wyjątkiem fluktuacji stężeń, tak więc w większości przypadków można je pominąć [38].

Rozpraszanie światła zostało po raz pierwszy zaobserwowane przez Arago [39] i Gioviego [40], a zbadał to zjawisko Tyndall [41] (dla cząsteczek mniejszych niż długość fali padającego światła). Tyndall odkrył, że światło rozproszone ma niebieskawe zabarwienie, podczas gdy światło odbite ma zabarwienie czerwone. Tyndall w swoim eksperymencie zaobserwował polaryzację światła rozproszonego pod kątem  $90^\circ$ .

Intensywność rozpraszania światła i jego zależność kątową (współczynnik rozpraszania światła) można określić na podstawie parametrów optycznych ośrodka oraz parametrów optycznych i geometrycznych cząstek.

Pierwszą teorią opisującą rozpraszanie światła na molekułach gazu przedstawiona została przez Lorda Rayleigha w latach 1871-1899. Przyjęto w niej, że światło rozproszone jest promieniowaniem emitowanym przez dipole elektryczne pobudzone do drgań przez pole elektryczne fali padającej. Teoria Rayleigha wyznaczyła przewidywalną zależność intensywności promieniowania rozproszonego od długości fali (jak  $\frac{1}{4} \lambda$ ).

Przewidywała ona również polaryzację liniową promieniowania rozproszonego. Teoria Rayleigha znalazła zastosowanie w opisie rozpraszania światła na małych cząstkach, których liniowy wymiar  $d$  jest znacznie mniejszy od długości fali rozpraszanego światła  $\lambda$ , w przypadku  $d < \lambda/10$ . Istotną cechą pozostaje fakt, że natężenie rozpraszania wykazuje zależność jak  $1/\lambda^4$  i tego typu zależność przyjęto nazywać prawem Rayleigha.

Zauważyć należy, że natężenie promieniowania przechodzącego przez ośrodek rozpraszający o grubości  $x$  zmienia się eksponentalnie (tj.  $\exp(-\gamma x)$ ), w którym współczynnik rozpraszający  $\gamma$  jest odwrotnie proporcjonalny do  $\lambda^4$ . W teorii rozpraszania Rayleigha przewidywana jest taka sama intensywność rozpraszania do przodu i do tyłu, ma ona symetrię osiową na osi wyznaczonej kierunkiem padającego promieniowania.

W przypadku gdy wymiary rozpraszanych cząstek są porównywalne z długością fali konieczne jest zbudowanie innej teorii rozpraszania, pasującej do opisu rozpraszania na sferycznych cząstkach metalu w koloidalnym roztworze. Opracował ją Gustaw Mie w 1908 roku [42]. W teorii tej istotnym parametrem jest stosunek promienia sfery rozpraszającej do długości fali tj. wielkości  $d/\lambda$ . Przy małej wartości tego stosunku charakter rozkładu kąтового natężenia rozproszenia odpowiada przewidywaniom teorii Rayleigha, a ze wzrostem rozpraszania nie staje się coraz bardziej symetryczne z domieszką rozpraszania do przodu. Ważną cechą rozpraszania Mie jest, iż dla cząstek o wymiarach większych od długości fali natężenie rozpraszania słabo zależy od długości fali  $\lambda$ , by dla dużych wartości  $d/\lambda$  zupełnie zniknąć

Bardziej skomplikowane teorie rozpraszania światła uwzględniają dodatkowo współczynnik kształtu, jednorodność i inne parametry cząstek. Zostały one opracowane znacznie później przez van de Hulsta, Kerker, Hodkinsona i innych [43–45]. Znane są również inne teorie dotyczące cząstek nanometrycznych, uwzględniające ruch ośrodka, w którym poruszają się cząstki opracowane między innymi przez Smoluchowskiego [46], Cabanessa [47], Strutta [48] i Wooda [49].

W przypadku pomiarów optycznych rozkład wielkości pojedynczych cząstek jest określany przez porównanie amplitud wykrytych impulsów sygnałów optycznych, które odpowiadają przepływowi pojedynczych cząstek przez niewielką, oświetloną strefę.

Na podstawie zarejestrowanych pomiarów można określić [38]:

- gęstość cząstek z równań ruchu w przypadku cząstek przyspieszających,
- ładunek elektryczny analizując trajektorię cząstek poruszających się w polu elektrycznym,
- współczynnik załamania światła na podstawie rozpraszania w przód i w tył, przy różnych długościach fali,
- prędkość cząstek za pomocą laserowych metod dopplerowskich.

Obecnie w praktycznych rozwiązaniach stosuje się diodę laserową (najczęściej o długości fali 650 nm) lub diodę pracującą w zakresie promieniowania podczerwonego (IR). Pomiędzy źródłem światła a fotoelementem, którym najczęściej jest fotodioda, znajduje się cząstka. W zależności od rozwiązania, wymusza się przepływ laminarny przy pomocy wentylatora lub rezystora grzejnego. Metoda pomiaru zapylenia przy zastosowaniu dyfrakcji laserowej jest wykorzystywana w wysokiej klasy przyrządach pomiarowych oraz w niedrogich modułach pozwalających na monitorowanie jakości powietrza (gdzie wielkość cząsteczek nie przekracza 100  $\mu\text{m}$ ).

W praktyce, w tańszych rozwiązaniach, układ optyczny jest przystosowany do pomiaru jednej średnicy cząstek (np. 2.5  $\mu\text{m}$ ). Pomiar cząstek o większych średnicach zazwyczaj polega na aproksymacji wartości na podstawie sygnału z detektora, przystosowanego do pomiaru mniejszych cząstek.

Algorytm pomiarowy oraz poszczególne rozwiązania są zróżnicowane w zależności od ceny, producenta oraz posiadanych patentów [50–53].

W patencie EP0359681A2 [50] opisano nową metodę pomiaru zapylenia, która może być użyta do cząsteczek o znanych wymiarach. Dodatkowo w patencie zamieszczono specyfikację techniczną urządzenia. Metoda została określona jako „*Modulated Dynamic Light Scattering*” (MDLS), ponieważ wykorzystuje modulację światła padającego na mierzone cząsteczki, a także uwzględnia zaburzenia wywołane ruchami Browna.

Patent US6118532A [51] opisuje urządzenie wykorzystujące dynamiczne rozpraszanie spójnego światła na mierzonej próbce, która jest ustawiona na obrotowym stoliku roboczym. Próbka wykonuje ruch obrotowy wokół swojej osi. Rozproszone światło trafia na detektory znajdujące się wokół próbki.

Podobnie patent US6459093B1 [52] opisuje urządzenie wykorzystujące metodę absorpcji światła laserowego przy pomiarze fotoluminescencji.

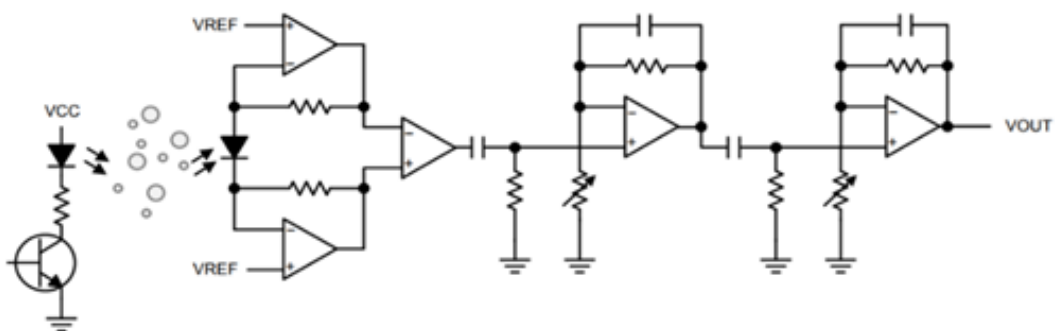
W patencie US7087885B1 [53] opisano aparaturę oraz metodę pomiaru rozkładu cząstek z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej. Zastosowane rozwiązanie zmniejsza współczynnik rozpraszania światła, przez co ogranicza błąd wynikający z rozmiaru oraz koloru cząstek.

W rozwiązaniu z patentu EP1884762A2 [54] wykorzystano dwa źródła światła, które oświetlają próbkę oraz zestaw detektorów umieszczonych wokół próbki. Zastosowanie dwóch źródeł światła ma na celu poprawienie dokładności pomiaru.

### 3.3.3 Pomiar zapylenia metodą dyfrakcji laserowej

Czujniki optyczne można podzielić na dwie grupy:

- Czujniki analogowe, wykorzystujące zjawisko dyfrakcji laserowej (napięcie na fotoelemencie jest proporcjonalne do wartości zapylenia Rys. 3-8) w roli oświetlacza wykorzystuje zazwyczaj diodę IR (*Infrared*). Tą grupę czujników charakteryzuje najniższy koszt oraz mała liniowość pomiarów. Przykładem urządzenia z tej grupy jest sensor Sharp GP2Y1010AU0F [55].
- Czujniki cyfrowe, gdzie możemy określić kształt oraz ilość pojedynczych cząsteczek (Rys. 3-9). Zazwyczaj są to systemy laboratoryjne przeznaczone do automatycznych analiz.



Rys. 3-8 Schemat elektryczny typowego czujnika jakości powietrza wykorzystującego zjawisko dyfrakcji laserowej [20]

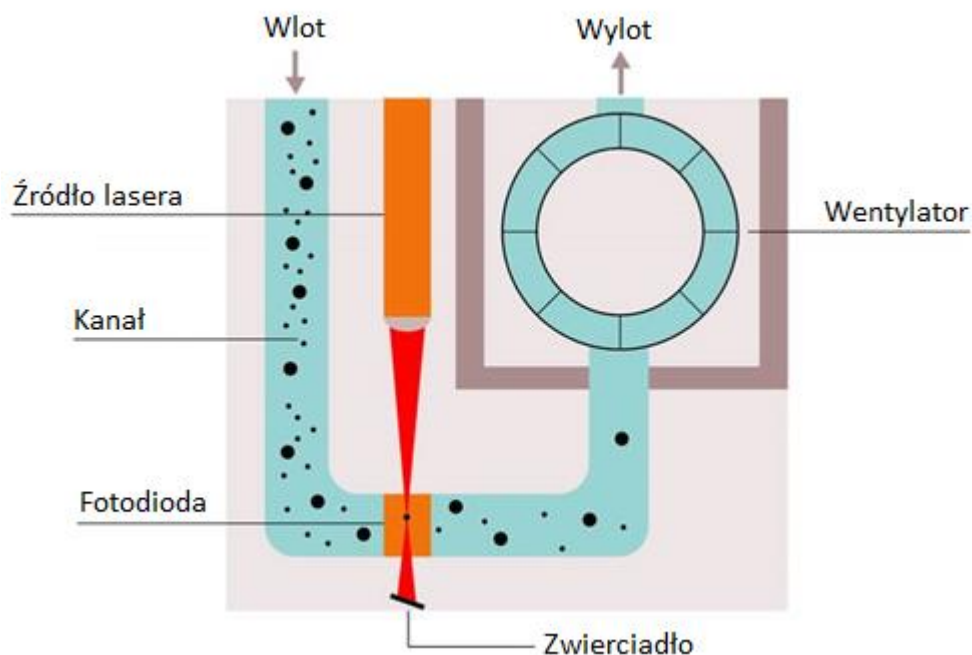


Rys. 3-9 Laboratoryjne analizatory wielkości cząstek [56]

Pośrednim rozwiązaniem pomiędzy najtańszymi oraz najdroższymi systemami pomiarowymi do pomiaru zapylenia są moduły, które zawierają w sobie wentylator zasysający powietrze, tor optyczny, część analogową kondycjonującą sygnał oraz mikrokontroler wyposażony w interfejsy umożliwiające wysyłanie danych poprzez UART, I2C lub za pomocą sygnału PWM (np. SPS30) [57]. Czujniki tego typu (Rys. 3-10) wykorzystywane są między innymi w oczyszczaczach powietrza, w celu monitoringu stężenia zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń (*indoor quality air sensor*).

Warto w tym miejscu podkreślić, iż przepływ powietrza w niskokosztowych czujnikach może być realizowany na trzy sposoby:

- przy pomocy wentylatora zasysającego powietrze (np. Sensirion SPS30 [57]),
- za pomocą rezystora grzejnego – konwekcji (np. Shinyei PPD24NS [58]),
- w sposób nie wymuszony (np. Sharp GP2Y1010AU0F) [55]).



Rys. 3-10 Schemat typowego czujnika jakości powietrza wykorzystującego zjawisko dyfrakcji laserowej [57]

Parametry oraz dokładności detektorów, wykorzystujących zjawisko dyfrakcji laserowej, określa norma ISO 13320:2020 [59]. Przy ocenie prawidłowości wyników pomiarów oraz sprawdzaniu, czy procedury pomiarowe generują odpowiednie wartości w stosunku do wzorcowych, sprawdza się powtarzalność oraz odtwarzalność. Jest to ściśle związane z dokładnością detektora oraz ze strukturą próbki.

Parametry niektórych laboratoryjnych systemów wykorzystujących zjawisko dyfrakcji laserowej przedstawiono w

. Na ogół są to systemy stacjonarne przeznaczone do pomiaru ciągłego zapylenia. W tym przypadku medium robocze w którym występuje dyspersja stanowi ciecz lub czyste powietrze.

Tab. 3-1 Parametry niektórych profesjonalnych urządzeń pomiarowych wykorzystujących zjawisko dyfrakcji laserowej [8]

Model	Zakres pomiarowy	Czas analizy	Źródło światła	Liczba światłoczułych elementów detektora	Sposób dyspersji
LA-300 (Horiba)	100nm – 600µm	20 s	dioda laserowa, 650nm	42	ciecz
SALD-7500nano (Shimadzu)	7nm – 800µm	10 s	dioda laserowa, 405nm	76	ciecz
Mastersizer 3000 (Malvern)	10nm – 3500µm	<10 s	laser He-Ne, 632.8nm, LED, 470nm	-	powietrze/ciecz
ANALYSETTE 22 NanoTec (Fritsch)	10nm – 2000µm	5–10 s	2X dioda laserowa, 532nm dioda IR, 940nm	75	powietrze/ciecz
Helos Quixel (Sympatec)	100nm – 8750µm	10 s	laser He-Ne 632,8nm	31	powietrze/ciecz

Czujniki wykorzystujące zjawisko dyfrakcji laserowej podczas pomiaru dokonują wielu przekształceń. Jest to związane z metodą pomiaru oraz zasadą działania przetwornika analogowo-cyfrowego. W związku z tym trudno porównywać wyniki otrzymane z pomiaru metodą dyfrakcji laserowej oraz analizy sitowej [60,61].

Warto zauważyć, iż na rynku bardzo rzadko pojawiają się moduły do pomiarów większych cząstek niż 10 µm. Moduł umożliwiający pomiar cząstek o średnicy nie przekraczającej 100 µm to SDS198 [62] to zmodyfikowana wersja sensora SDS011 [63].

### 3.3.4 Projekt “Sensor Community”

W ostatnich latach widać zmożony trend monitorowania poziomu jakości powietrza tanimi czujnikami oraz wzrost ilości publikacji w tej tematyce [64–66]. Niestety brak odniesienia pomiarów niskokosztowych czujników zapylenia do referencyjnych metod (jakimi są metody wagowe) powoduje, że wskazania nie mogą być uznawane za wiarygodne źródło pomiarów. W Polsce pomiary wykonywane są w stacjach Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska (WIOŚ). Miejsce lokalizacji stacji oraz poziomy zanieczyszczenia powietrza zawarte są w dyrektywach Unii Europejskiej [5,67].



Najbardziej rozpowszechnionymi dwoma platformami do pomiaru pyłu PM2.5 oraz PM10 wykorzystującymi dane z niskokosztowych czujników zapylenia są projekty *Sensor Community* (dawniej znany jako Luft Daten) [68] oraz rozwiązanie firmy Airly [69]. *Sensor Community* jest to projektem open-source, co oznacza, iż każdy może go wykonać samodzielnie oraz podłączyć go do sieci Internet.

Po rejestracji na stronie pojawi się na mapie, gdzie można odczytywać stężenia pyłu w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie oparte jest o sensor Nova Fitness SDS011 [63] lub SPS30 [57] oraz moduł node MCU, z układem ESP8266 [70] wyposażonego w interfejs WiFi. Zmontowany sensor z projektu sensor community przedstawia Rys. 3-11.



Rys. 3-11 Zmontowany sensor w z projektu *Sensor Community* / *Luft Daten* [71]

W Polsce najbardziej znanym systemem komercyjnym jest system firmy Airly posiadający podobne funkcjonalności co projekt *Sensor Community*. Niestety obecnie oferta jest przeznaczona głównie dla lokalnych samorządów w formie abonamentu. Rozwiązanie firmy Airly bazuje na module PMS5003 [72]. Zamontowany czujnik firmy Airly przedstawia Rys. 3-12.

Warto zwrócić uwagę na open-source'owy projekt czujnika o nazwie My-part, gdzie opracowano cały sensor od podstaw, zaczynając od kształtu komory pomiarowej, a kończąc na algorytmie pomiarowym i linearyzacji odpowiedzi sensora [65,73].



Rys. 3-12 Sensor firmy Airly

Żadne z przedstawionych rozwiązań nie może być brane pod uwagę jako wiążące źródło informacji, ponieważ czujniki nie są kalibrowane w odniesieniu do żadnej referencyjnej metody pomiarowej.

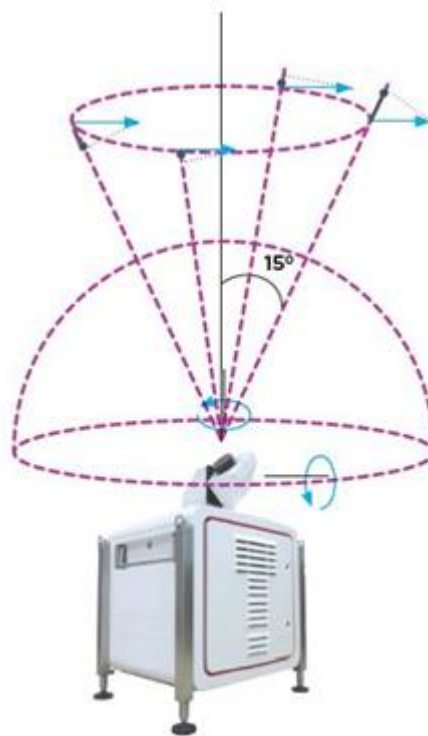
Warto podkreślić, iż pomiary automatyczne wykonane metodami optycznymi w stacjach WIOŚ są modyfikowane po pomiarach wagowych.

### 3.3.5 Pomiary lidarowe

Lidar emituje monochromatyczną wiązkę w kierunku chmury aerozolu. Fotony rozproszone wstecznie mogą być klasyfikowane ze względu na czas ich dotarcia do badanego obiektu, który jest zależny od odległości od badanych cząstek. Odbiornik i emiter są zwykle umieszczone obok siebie, a kąt rozpraszania wynosi ok. 180 stopni. Stosowane są również lidary, gdzie emiter i odbiornik są od siebie odseparowane.

Pomiary lidarowe mogą być wykonywane przy kilku długościach fal, umożliwia to określenie rozkładów wielkości cząstek w aerozolu. Wszystkie wymienione właściwości pomiarów lidarowych umożliwiają badanie struktury pionowej lub poziomej aerozolu, a także ocenę stężenia zapylenia w czasie oraz pozycji w przestrzeni cząstek pyłu [74]. Lidary mogą być stacjonarnymi urządzeniami naziemnymi lub urządzeniami montowanymi

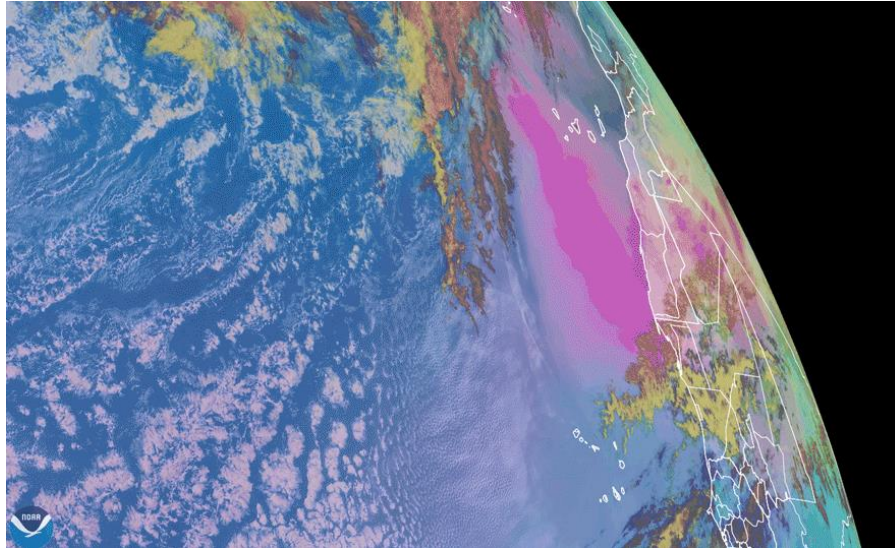
na satelitach geostacjonarnych. Przykładowy lidar naziemny do pomiaru zapylenia przedstawiono na rysunku Rys. 3-13.



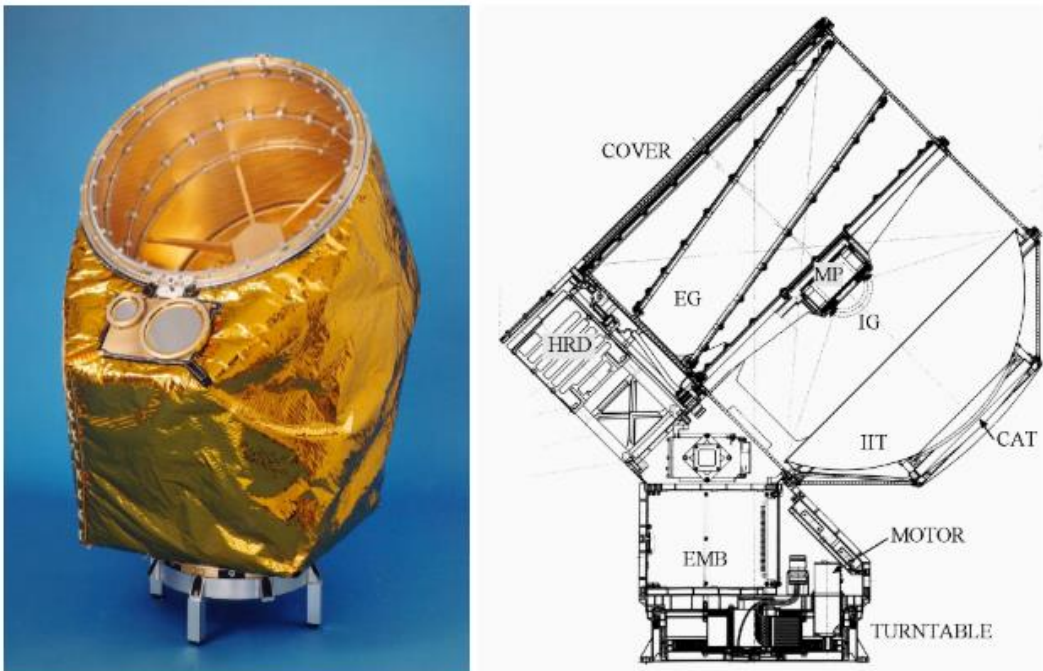
Rys. 3-13 Lidar stacjonarny do pomiaru zapylenia [75]

### 3.3.6 Pomiar zapylenia w przestrzeni kosmicznej

Zbieranie informacji na temat zapylenia jest tak istotne, iż satelity meteorologiczne NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) np. NOAA GOES East/GOES-16 oraz sondy kosmiczne np. Cassini-Huygens wyposażone są w urządzenia do analizy oraz pomiaru zapylenia [76,77]. Satelity te swoim zasięgiem mogą obejmować wielkie obszary. Wspominany wcześniej satelita nadzoruje większość Ameryki Północnej, w tym Stany Zjednoczone i Meksyk, a także Amerykę Środkową i Południową, Karaiby i Ocean Atlantycki do zachodniego wybrzeża Afryki. Satelita może być wykorzystywany również do monitorowania innych zjawisk, tj. jak burze tropikalne i huragany [78]. Zwizualizowane dane z satelity GOES-16 przedstawia Rys. 3-14, a instrument pomiarowy z sondy Cassini-Huygens Rys. 3-15.



Rys. 3-14 Zwizualizowane dane z satelity GOES-16 – pył z nad powierzchnią Sahary [78]



Rys. 3-15 Kosmiczny czujnik pyłu zamontowany na sondzie Cassini-Huygens [76]

### 3.4 Określanie średnicy cząstek
















Stosując różne metody pomiaru można otrzymać różne średnice mierzonej cząstki w zależności od zastosowanej metody pomiarowej [60,79].

Dlatego wprowadzono definicje poszczególnych średnic odnoszących się do sposobu pomiaru oraz warunków w jakich został przeprowadzony jest pomiar. Definicję poszczególnych średnic przedstawia Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Definicje poszczególnych średnic cząstek na podstawie [80] oraz [81]

Symbol	Nazwa	Definicja
$d_s$	rozmiar sitowy	minimalny rozmiar boku kwadratowego oczka w sicie, przez które zdołało przejść ziarno
$d_s$	rozmiar powierzchniowy	średnica kuli o takiej samej powierzchni jak rozpatrywane ziarno
$d_v$	rozmiar objętościowy	średnica kuli o takiej samej objętości jak rozpatrywane ziarno
$d_r$	rozmiar projekcyjny (średnica projekcyjna)	średnica kuli o takiej samej powierzchni przekroju jak powierzchnia rzutu ziarna na płaszczyznę jego stabilnego spoczynku
$d_{st}$	rozmiar wg Stokesa	średnica kuli o takiej samej gęstości i opadającej w lepkim ośrodku z taką samą szybkością jak rozpatrywane ziarno ( $Re < 0,2$ )
$d_{sw}$	rozmiar według powierzchni właściwej	średnica kuli o takim samym stosunku $S/V$ jak rozpatrywane ziarno
$d_F$	rozmiar Fereta	średnia odległość pomiędzy dwoma równoległymi liniami st stycznymi do rzutu ziarna
$d_M$	rozmiar Martina	średnia długość cięciwy rzutu ziarna
$d_{ae}$	rozmiar aerodynamiczny	średnica cząstki kulistej o gęstości $\rho_o = 1\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i jest równa średnicy kuli, która ma taki sam współczynnik oporu aerodynamicznego jak dana cząstka.

Porównywanie takich samych wartości, określających średnice cząstek przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych, może powodować błędy zwłaszcza dla cząstek o niesferycznych kształtach, co przedstawia Rys. 3-16.

Particle	$d_v$	$d_{St}$	$d_M$	$d_{ae}$
 Particle 1	 50 $\mu\text{m}$	 38.7 $\mu\text{m}$	 42.2 $\mu\text{m}$	 54.8 $\mu\text{m}$
 Particle 2	 50 $\mu\text{m}$	 50 $\mu\text{m}$	 50 $\mu\text{m}$	 70.7 $\mu\text{m}$
 Particle 3	 62.0 $\mu\text{m}$	 59.7 $\mu\text{m}$	 62.0 $\mu\text{m}$	 84.4 $\mu\text{m}$

Rys. 3-16 Porównanie różnych średnic cząstek odniesionych do różnych definicji średnicy [80]

Mając na uwadze fakt, iż wszystkie średnice cząstek można opisać, powstały tabele pozwalające przeliczać między sobą wartości średnic dla cząstek sferoidalnych oraz dla cząstek niesferoidalnych [80].

### 3.4.1 Podział pyłu ze względu na rozmiar cząstek

Jednym z najlepszych opracowań, dotyczących praktycznych pomiarów wagowych (które są metodą referencyjną do innych metod pomiarów zapylenia), został dokument autorstwa dr. Sławomira Janasa przy realizacji „Międzylaboratoryjnych Badań w zakresie metody filtracyjno – wagowej” w roku 2010 [82].

Jak czytamy w dokumencie opracowanym przez niego:

*„Pyłem nazywamy zbiór cząstek stałych, które wyrzucone w powietrze, pozostają w nim przez pewien czas. Przyjmuje się, że są to cząstki o wymiarach poniżej 300  $\mu\text{m}$ . Ich kształt jest zależy od pochodzenia pyłu. Inny kształt mają cząstki pochodzenia organicznego, a inny nieorganicznego. Z tego też względu pojęcie wymiaru cząstki jako pojedynczego obiektu jest pojęciem umownym.*

Wielkość cząstek może być podawana w pewnych przedziałach jako:

- cząstki bardzo grube -  $d_a > 10 \mu\text{m}$
- cząstki grube -  $2,5 \mu\text{m} < d_a \leq 10 \mu\text{m}$
- cząstki drobne -  $0,1 \mu\text{m} < d_a \leq 2,5 \mu\text{m}$
- cząstki bardzo drobne -  $d_a \leq 0,1 \mu\text{m}$

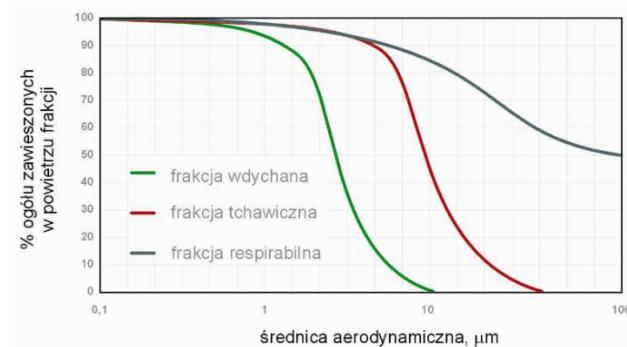
Dla potrzeb określania ich wielkości stosuje się następujące terminy:

- średnica zastępcza ziarna pyłu - jest to średnica kuli o gęstości równej gęstości badanego pyłu, której prędkość opadania w nieruchomym powietrzu jest równa prędkości opadania badania ziarna pyłu
- średnica aerodynamiczna cząstki pyłu - jest to średnica kuli o gęstości  $1\text{g/cm}^3$  i takiej samej prędkości opadania w nieruchomym powietrzu, jak prędkości opadania badania cząstki
- średnica projekcyjna - jest to średnica koła, którego powierzchnia jest powierzchnią rzutu cząstki na płaszczyznę obserwacji

Z higienicznego punktu widzenia pył nie jest substancją sypką lecz układem dwufazowym zwanym aerozolem. Jedną z faz jest powietrze (faza rozpraszająca), a drugą ciało stałe (faza rozproszona). Oceniając szkodliwość pyłów, najbardziej szkodliwa jest frakcja respirabilna, która dociera do pęcherzyków. Pomiar frakcji respirabilnej dokonuje się za pomocą selektorów cyklonowych, które oddzielają frakcję respirabilną od innych pyłów”.

Według normy EN-481 zdefiniowane są jeszcze dwie frakcje pyłu (Rys. 3-17):

- frakcja wdychana (przedostaje się przez usta i nos)
- frakcja płucna (pył docierający do oskrzeli)



Rys. 3-17 Podział pyłu na frakcje [82]

### 3.5 Analiza rynku urządzeń przenośnych stosowanych do ciągłego pomiaru zapylenia

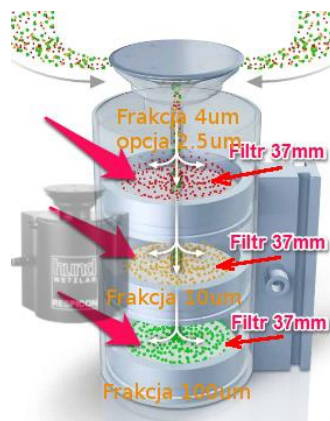
Na rynku istnieje wiele urządzeń przenośnych do pomiaru zapylenia, większość z nich wykorzystuje zjawiska, które nie pozwalają na określenie wartości zapylenia w czasie rzeczywistym.

Po analizie dostępnych rozwiązań na rynku znaleziono jedynie jedno urządzenie do ochrony indywidualnej, wykorzystujące metodę fotometryczną oraz wagową do pomiaru zapylenia. Urządzenie zostało opracowane przy współpracy z Niemieckim Instytutem Bezpieczeństwa Pracy (IFA, Sankt Augustin) i Fraunhofer Institute (Hanower).

System o nazwie Respicon 2 TM [83] Rys. 3-18 składa się z impaktora Rys. 3-19, który rozdziela frakcje oraz umożliwia pomiar wagowy poszczególnych frakcji i aspiratora (czyli pompy o stałym przepływie). Parametry systemu Respicon 2 TM przedstawia Tab. 3-3.



Rys. 3-18 System Respicon 2 TM podczas pomiaru zapylenia [83]



Rys. 3-19 Budowa impaktora przeznaczonego do systemu Respicon 2 TM [83]



Jak widać na rysunku Rys. 3-18 pracownicy podczas wykonywania swoich obowiązków mają specjalne szelki umożliwiające zamontowanie systemu pomiarowego oraz przewodów. Montaż urządzenia w taki sposób może ograniczać ruchy pracowników, a co za tym idzie wpływać na ich efektywność.

Tab. 3-3 Parametry systemu System Respicon 2 [83]

	Respicon TM	Respicon 2 TM
Zasada działania	Równoczesne zbieranie cząstek w trzech różnych frakcjach zgodnych z EN481 (wdychalna, torakalna, respirabilna). Pomiar fotometryczny cząstek na każdym z w/w poziomów	
Frakcje	Frakcja wdychalna < 100µm Frakcja torakalna (tchawiczna) <10µm Frakcja respirabilna < 4µm (w opcji <2.5µm)	
Zasada separacji	impaktor	
Zakres pomiarowy [mg/m <sup>3</sup> ]	0...200	0...10
Czułość [mV/mg/m <sup>3</sup> ]	20	300
Limit detekcji [µg/m <sup>3</sup> ]	ok. 50	ok. 30
Filtry	Kasetka na filtry membranowe (37mm)	
Montaż	1/4" w podstawie	
Wymiary	110 x 60mm	
Wzorce	EN481, ISO7708, ACGIH, AIHA, MAK, TRGS900, raport zgodny z prEN 13205 oraz DU poz. 817/23.06.2014	
<b>Pompka</b>		
Przepływ [l/min]	3.11	6.22
Spadek ciśnienia	4kPa	
Czas pracy [h]	>8	ok. 24
<b>Rejestrator</b>		
Kanały	4 plus jeden dla dodatkowych czujników	
Interfejs	USB, Bluetooth	
Interwał zapisu do pamięci [s]	1...3600, krok programowalny 1s	
Pojemność pamięci	6dni @ interwał 1s lub do 9 dni dla większych interwałów	
Oprogramowanie	Respicon TM / data logger	
Zasilanie	akumulator Li-ion, ładowanie do 6h	
Sposób zasilania	USB	
Czas pracy	8h	
Wyświetlacz	3.2" dotykowy	
Akcesoria	oprogramowanie, walizka, etui	
Wymiary	185x100x40	

Koszt jednostkowy systemu mieści się w granicach 20 tys. zł (w roku 2021) i jest obecnie jedynym rozwiązaniem, które umożliwia bardzo precyzyjny pomiar zapylenia wykorzystując metodę fotometryczną oraz wagową.

Przykładowe obszary zastosowania osobistego pyłomierza sugerowane przez producenta to [83]:

- budownictwo,
- przemysł spożywczy,
- obróbka drewna,
- produkcja betonu,
- produkcja części do formowania wtryskowego,
- przemysł wydobywczy,
- spawalnictwo, systemy cięcia lub łączenia materiałów.

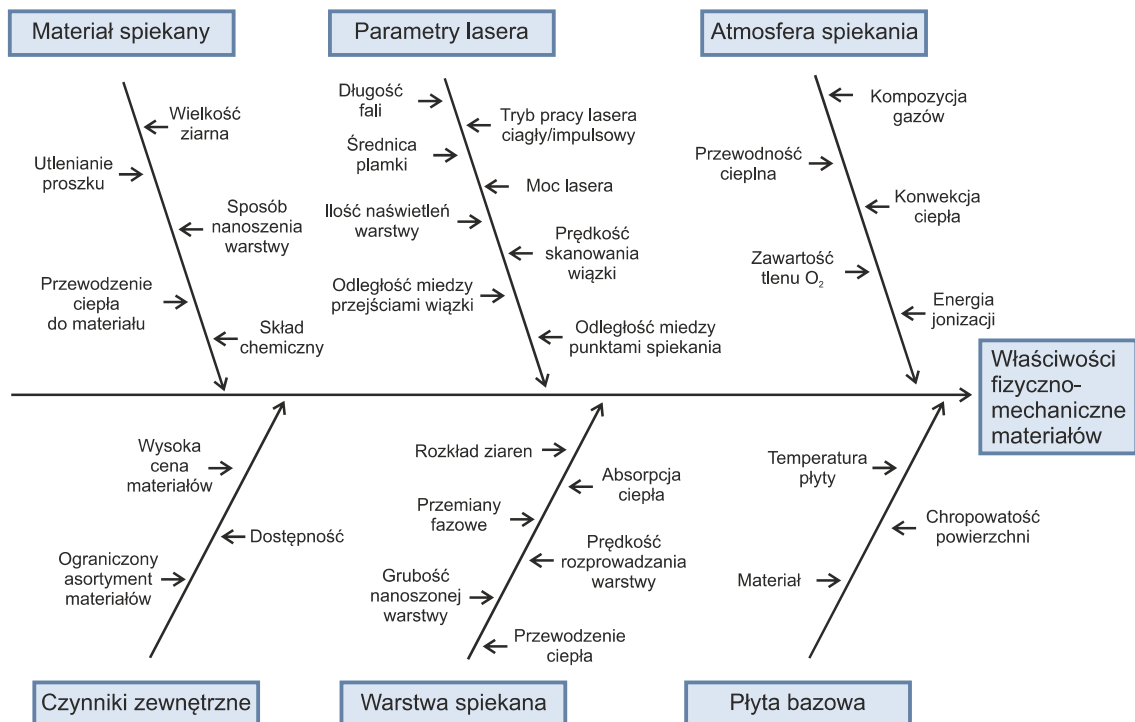
Obecnie dąży się do aplikacji niskoskosztowych czujników przeznaczonych do pomiaru jakości powietrza. Badania w tym zakresie obejmują kalibracje sensorów [84], modyfikację układu elektronicznego detektora lub algorytmu analizującego sygnał [85].

### **3.6 Metody atomizacji proszków metalicznych**

Atomizacja to proces przekształcania ciała stałego, cieczy lub roztworu w drobne cząstki lub kropelki w objętości gazu, próżni lub cieczy [6].

Na właściwości otrzymanych cząstek duży wpływ ma wielkość atomizera, właściwości materiału wsadowego oraz właściwości ośrodka w którym dochodzi do atomizacji.

Duże znaczenie dla jakości otrzymywania elementów w procesie SLM/DMLS mają właściwości sproszkowanego materiału. Rozkład uziarnienia w danym procesie atomizacji oraz kulistość świadczą o jakości otrzymanego proszku, determinuje ona z kolei jakość otrzymanej powierzchni oraz ma wpływ na gęstość wytworzonego detalu (Rys. 3-20). Stanowi to kluczowy parametr jeśli chodzi o zastosowania eksploatacje elementów wytworzonych w tej technologii [6].



Rys. 3-20 Wpływ poszczególnych czynników na gęstość otrzymanego detalu w procesie spiekania laserowego (SLS) [86]

Najbardziej popularnymi metodami atomizacji przeznaczonymi do otrzymywania proszków metalicznych stosowanych w procesach SLS/SLM są:

- atomizacja w gazie,
- atomizacja w cieczy.

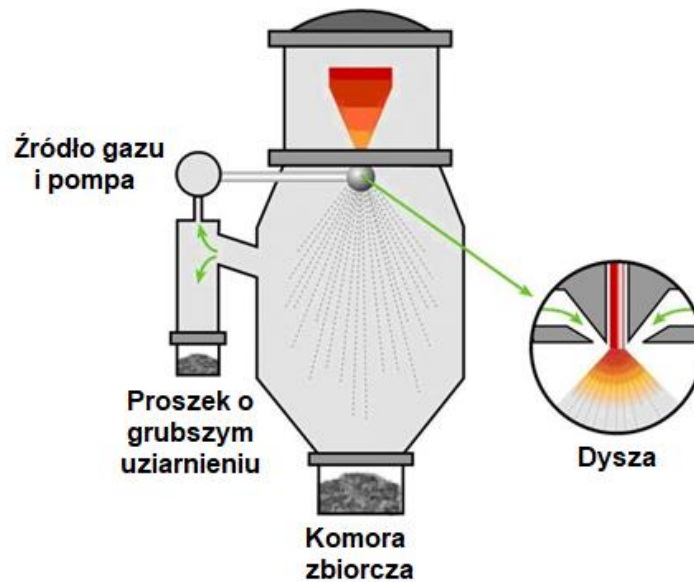
Istnieją również inne metody otrzymywania metalicznych sferoidalnych proszków. Są to między innymi [6]:

- atomizacja w plazmie (*plasma atomisation*),
- metoda EIGA (*electrode induction melting gas atomisation*),
- proces PREP (*plasma rotating electrode process*),
- atomizacja z użyciem wirującego dysku (*rotating disk atomisation*).

### 3.6.1 Atomizacja w gazie

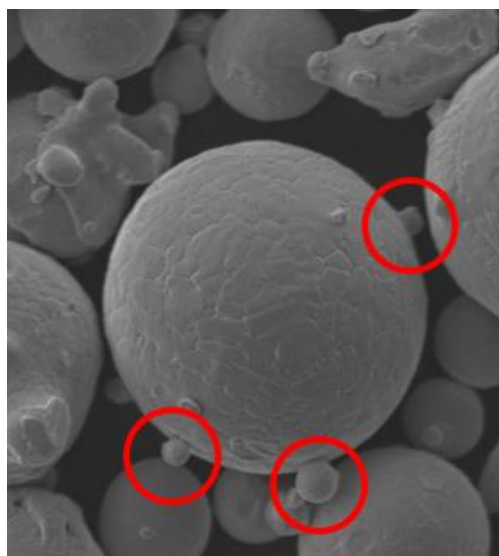
Atomizacja w gazie (*gas atomisation*) jest najbardziej rozpowszechnioną metodą wytwarzania wysokiej jakości proszków metalicznych przeznaczonych do procesów SLS/SLM.

Materiał wsadowy jest topiony pod osłoną gazu obojętnego lub w próżni. Następnie ciśnienie gazu wymusza przejście stopionego stopu przez dyszę, gdzie stopiony metal rozprasza się na drobne krople, które zastygają podczas opadania w wieży atomizującej (Rys. 3-21).



Rys. 3-21 Schemat działania atomizera gazowego [87]

Zastygłe cząsteczki proszku mają przeważnie kształt kulisty, z niewielką ilością cząstek asymetrycznych. Wraz z dużymi cząstkami obserwuje się także małe cząstki zwane satelitami (Rys. 3-22). Satelita to mała cząstka, która łączy się z większą cząsteczką podczas krzepnięcia.



Rys. 3-22 Zdjęcie cząstki stali MS1 o rozmiarach około 40 μm z zaznaczonymi satelitami

Maksymalna wielkość cząstek w otrzymywanych w tym procesie wynosi około 500  $\mu\text{m}$ . Cząstki w zakresie 20-150  $\mu\text{m}$  stanowią od 10% do 50% całości. Proces atomizacji w gazie jest najczęściej stosowany w przypadku otrzymywania stali nierdzewnej, stopów niklu, miedzi, tytanu oraz aluminium [87].

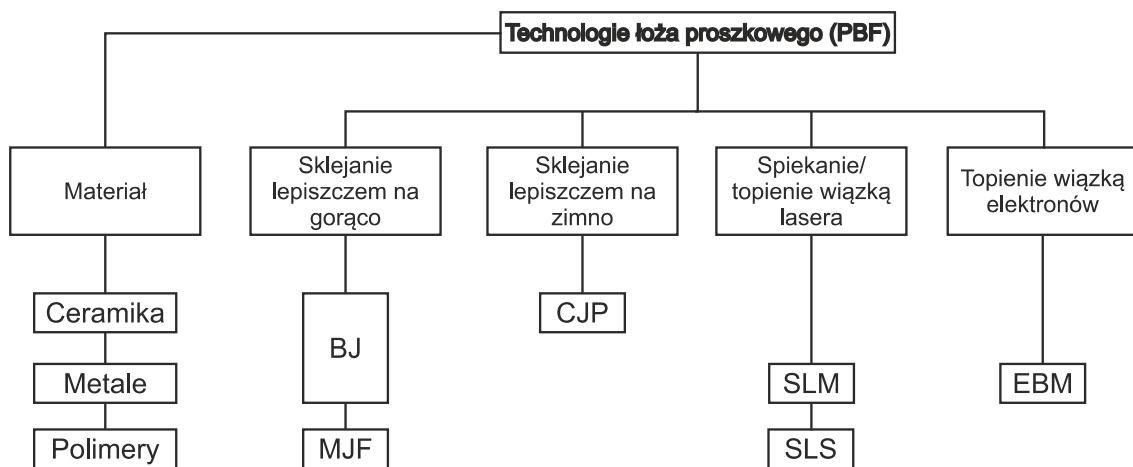
### **3.6.2 Atomizacja w cieczy**

Proces atomizacji w cieczy (*water atomisation*) jest podobny do procesu atomizacji w gazie, jako czynnika atomizującego używa się wody zamiast gazu. Proces ten jest tańszy niż atomizacja w gazie, jest wykorzystywany w przypadku materiałów słabo reaktywnych, takich jak np. stal. Ze względu na użycie cieczy, w procesie otrzymuje się cząstki o nieregularnym kształcie [87].

## 4. Wybrane technologie druku 3D wykorzystujące łożo proszkowe

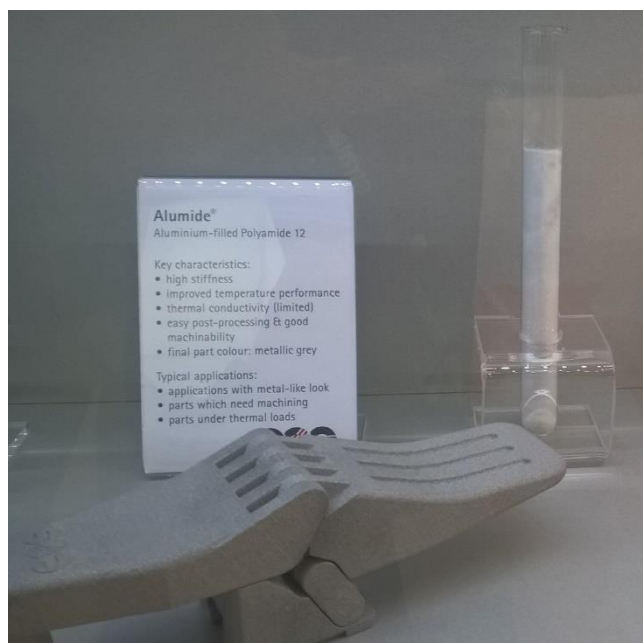
Technologie łoża proszkowego to wszystkie technologie wykorzystujące jako materiał budulcowy sproszkowany materiał. Wybrane technologie łoża proszkowego przedstawiono na

Rys. 4-1.



Rys. 4-1 Wybrane technologie łoża proszkowego

W zależności od technologii istotny wpływ na parametry otrzymanego detalu ma kształt cząstek proszku ze względu na kinetykę spiekania [86,88]. Proszki wykorzystywane w technologiach łoża proszkowego mogą być, metaliczne, ceramiczne, metaliczno-ceramiczne lub polimerowe. Ze względu na istotne różnice w przetwarzaniu proszków polimerowych, rzadko spotyka się urządzenia mogące pracować jednocześnie z proszkami metalicznymi i polimerowymi. Istnieją kompozyty zawierające w swoim składzie polimery oraz proszki metaliczne, przykładem takim jest materiał Alumide firmy EOS, który jest mieszaniną stopu aluminium oraz poliamidu 12. Element wykonany z materiału Alumide oraz sproszkowany materiał jest są przedstawiony na Rys. 4-2



Rys. 4-2 Sproszkowany materiał oraz element wykonany z materiału Alumide

Technologie łoża proszkowego możemy podzielić na podgrupy, w zależności od sposobu dostarczania energii do łoża proszkowego, gdzie następuje selektywne nagrzewanie, utwardzanie lub spiekanie materiału pod wpływem ciepła emitowanego z elementu grzejnego.

#### 4.1 Technologia MJF

Ze względu na część zastosowanych rozwiązań i wymagania utwardzania powierzchniowych warstw stosuje się źródła punktowe złożone z pikseli jak np. w urządzeniu 3d HP Jet Fusion 500 firmy HP. Zastosowano tam technologię MJF (*Multi Jet Fusion*), gdzie głównym elementem grzejnym jest listwa z pikselami, która wykonuje wspólny ruch ze zgarniaczem, a poszczególne piksele są zapalne po nałożeniu lepiszcza (tzw. agent) w odpowiednich miejscach, co prowadzi do konsolidacji ziaren proszku poliamidu.

Wyspecjalizowana głowica może nakładać kolory na zewnętrzne ściany detalu dając możliwość wykonywania elementów z materiału PA12 (poliamidu), a użycie promienników IR oraz listwy selektywnie dogrzewającej wybrane obszary pozwala na wyeliminowanie konieczności stosowania wiązki laserowej. Przykładowe elementy wykonane w technologii MJF przedstawia Rys. 4-3. Obróbka wykańczająca detali sprowadza się

do operacji wygładzania powierzchni poprzez piaskowanie w celu pozbycia się niespieczonych ziaren proszku oraz nieznacznego poprawienia gładkości powierzchni.

W przypadku innych urządzeń firmy HP, nie mających możliwości barwienia ścian wydruku podczas procesu formowania przyrostowego, istnieje możliwość zabarwienia otrzymanych elementów poprzez barwienie zanurzeniowe lub natryskowe [89].



Rys. 4-3 Etui do telefonu wykonane w technologii MJF przy pomocy urządzenia HP Jet Fusion 500 [90]

## 4.2 Technologia BJ

Kolejną technologią łoża proszkowego jest BJ (*binder jetting*). Technologia ta podobnie jak MJF, polega na nakładaniu warstw proszku lepiszcza zwanego binderem i termicznym utwardzaniu powierzchni materiału grzałkami zintegrowanymi z głowicą natryskującą w wybranych miejscach. Przykładem urządzeń działających w tej technologii mogą być: InnoventX firmy Xone, oraz system VX2000 firmy Voxeljet.

W przypadku urządzeń firmy Voxeljet głównymi aplikacjami są rdzenie odlewnicze lub formy piaskowe wykonywane z piasków odlewniczych. Przykładowe rdzenie oraz formę wytworzone na urządzeniu Voxeljet przedstawia Rys. 4-4.

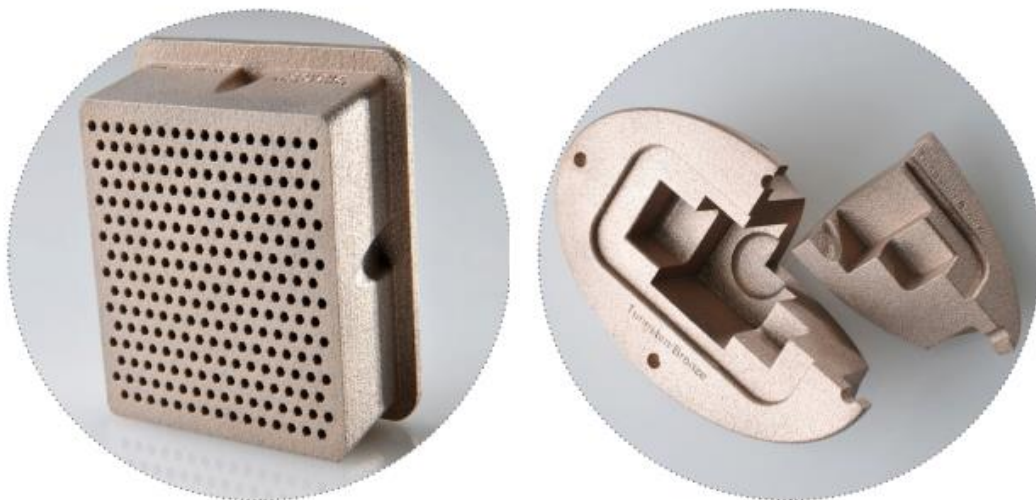




*Rys. 4-4 Forma oraz rdzenie wytworzone na urządzeniu firmy Voxeljet z piasku odlewniczego wraz z gotowym odlewem [91]*

W Przypadku urządzeń firmy Voxeljet obróbka wykańczająca zazwyczaj sprowadza się usunięcia niespieczonego proszku.

Urządzenia oferowane przez firmę Exone przeznaczone są do szerokiej gamy proszków metalicznych i ceramicznych oraz kompozytów metaliczno-ceramicznych. Przykładowe elementy wykonane ze stopu zawierającego wolfram oraz miedź (Rys. 4-5).



*Rys. 4-5 Elementy wykonane na urządzeniu firmy Exone z trudnoobrabialnego stopu zawierającego wolfram oraz miedź [92]*

W przypadku procesu technologicznego w urządzeniach firmy Exone naniesienie bindera powoduje wstępne nadanie kształtu i wytrzymałości detalowi (*green part*). Obróbka wykańczająca realizowana jest poprzez usunięcie niespieczonych ziaren proszku. Następnym etapem pozwalającym utrwalić kształt detalu jest infiltracja wydruku za pomocą bindera, a następnie jego wypalenie [89].

### 4.3 Technologia CJP

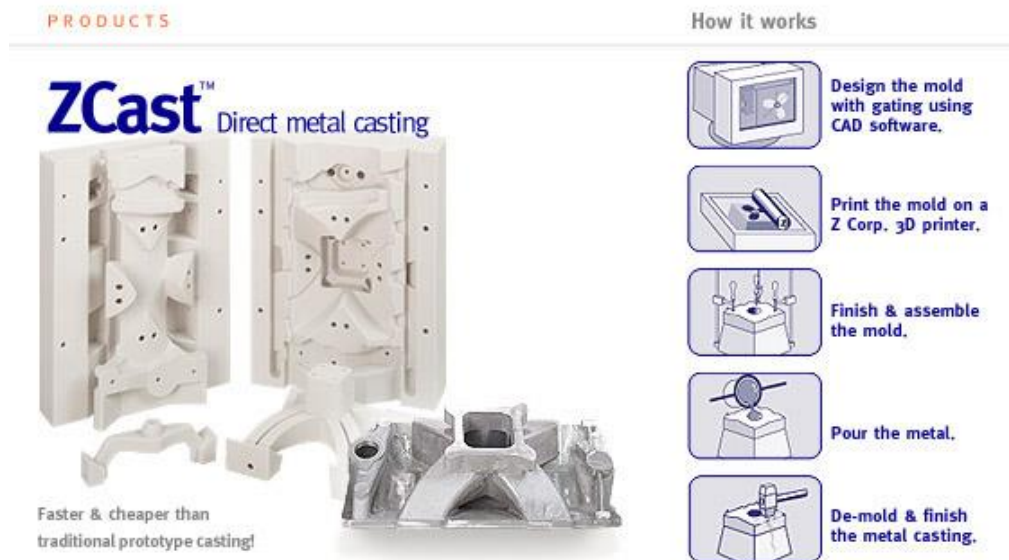
Jedną z technik wykorzystującą do pracy binder jest technologia CJP (*Color Jet Printing*). Działa podobnie jak w przypadku urządzeń firmy Exone i Voxeljet, jednak w przypadku technologii CJP nie jest konieczne dogrzewanie bindera. Przedstawicielem urządzenia wykorzystującego tę technologię jest urządzenie firmy 3D Systems o nazwie ProJet CJP 660Pro [93]. Pozwala ona na tworzenie kolorowych modeli z proszków ceramicznych (zazwyczaj na bazie gipsu). Przykładowy model wydrukowany w technologii CJP przedstawia Rys. 4-6.



Rys. 4-6 Element wytworzony na urządzeniu ProJet 4500 w technologii CJP [94]

Obróbka wykańczająca polega na usunięciu niesklejonego proszku i poddaniu wydrukowanego elementu procesowi infiltracji (substancjami bazującymi na cyjanoakrylu lub żywicy epoksydowej) w celu utwardzaniu wydruku [89].

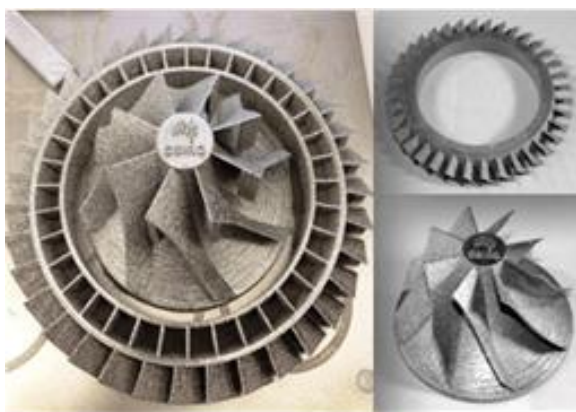
Jednym z ważniejszych zastosowań tej technologii jest wytwarzanie form gipsowych stosowanych w procesach odlewania. Technologię o nazwie Z-Cast przedstawia Rys. 4-7. (obecnie 2022 r. właścicielem rozwiązań firmy Z Corp jest firma 3D system).



Rys. 4-7 Forma gipsowa wykonana w technologii CJP wraz z gotowym odlewem [95]

#### 4.4 Technologia EBM

Technologia EBM (*Electron Beam Melting*) polega na dostarczeniu do łoża proszkowego energii przy pomocy wiązki elektronów. Proces ten, ze względu na użycie wiązki elektronów, odbywa się w próżni. Wiązka elektronów odchylna jest za pomocą cewek, przez które przepływa prąd, co powoduje odchylenie się wiązki i prowadzenie jej po płaszczyźnie obszaru roboczego. Przykładami urządzeń w technologii EBM mogą być np.: Arcam EBM Q10plus lub Freemelt ONE [96]. Proszki stosowane w technologii EBM są proszkami metalicznymi. Detale wykonane w technologii EBM przedstawia Rys. 4-8. Obróbka wykańczająca polega zazwyczaj na wyciągnięciu elementu z objętości proszku oraz na obróbce powierzchni detalu poprzez piaskowanie lub inne metody konwencjonalne [89].

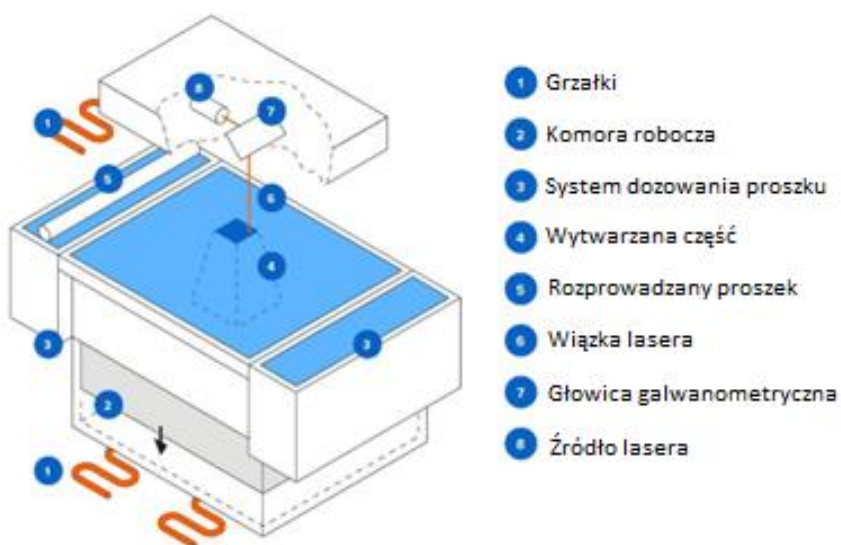


Rys. 4-8 Elementy wykonane w technologii EBM [97]

## 4.5 Technologia SLS oraz SLM

Technologia SLS (*Selective Laser Sintering*) oraz SLM (*Selective Laser Melting*) są technologiami w których energia do łoża proszkowego dostarczana jest za pomocą wiązki lasera. Proces SLS oraz SLM zazwyczaj odbywa się w osłonie gazu obojętnego, w celu zniwelowania degradacji materiału, oraz uniknięcia powstania ewentualnego wybuchu. W większości przypadków proces SLS jest utożsamiany ze spiekaniem proszków polimerowych, a proces SLM ze spiekaniem proszków metalicznych.

W przypadku procesu SLS złożę jest podgrzewane od spodu oraz od góry, a proszek na powierzchni łoża proszkowego utrzymywany jest w temperaturze bliskiej temperatury topnienia. Wiązka lasera dostarcza energię potrzebną do przetopienia proszku polimerowego i następuje rozprowadzanie kolejnej warstwy proszku w polu roboczym Rys. 4-9.



Rys. 4-9 Schemat procesu SLS [98]

Z uwagi na fakt, iż detal wisi swobodnie w całej objętości proszku, a proszek izoluje cieplnie, konieczne jest powolne chłodzenie całej objętości proszku, co może trwać nawet kilka godzin. Moc lasera w przypadku technologii SLS wynosi do 40 W. Uziarnienie metalicznego proszku wynosi zazwyczaj około 60  $\mu\text{m}$ . Proszki polimerowe do procesu SLS otrzymywane są na drodze pulweryzacji i nie posiadają sferycznych kształtów. Obróbka wykańczająca polega na piaskowaniu powierzchni detali, w celu usunięcia niespieczonych ziaren proszku. Istotnym jest to, że w przypadku ponownego procesu druku konieczne jest mieszanie proszku po procesie ze świeżym proszkiem w celu zachowania odpowiedniej jakości wytwarzanych elementów [89].

W przypadku technologii SLM, (czasami zwaną również DMLS *Direct Metal Laser Sintering*) konieczne jest, aby detal pomimo znajdowania się w objętości proszku był przytwierdzony do płyty bazowej co przedstawia Rys. 4-10.



Rys. 4-10 Rama drona wykonana w technologii SLM przytwierdzona do płyty bazowej za pomocą podpór [99]

Proces SLM nie wymaga dodatkowego dogrzewania od góry obszaru roboczego, ponieważ moc lasera zapewnia odpowiednie warunki do spieczenia metalicznego proszku.

Uziarnienie metalicznego proszku wynosi zazwyczaj około 45  $\mu\text{m}$ . Obróbka wykańczająca jest taka sama jak w procesie SLS i ma na celu usunięcie niespieczonych ziaren proszku. W odróżnieniu od procesu SLS, proszek jest przesiewany przez sito, aby zatrzymać grubsze frakcje, ale nie jest konieczne mieszanie odzyskanego materiału z proszkiem niepoddanym procesowi selektywnego spiekania laserowego (SLS).

Jeśli chodzi o proces SLS, na rynku można spotkać dwa segmenty urządzeń. Pierwszy to profesjonalne systemy dążące do automatyzacji procesu, dostarczane przez firmę EOS oraz Nexa3D, którymi przedstawicielami są np. EOS Formiga 500 oraz Nexa3D QLS 820. Przy czym nowsza konstrukcja firmy Nexa3D pozwala na znaczącą automatyzację procesu i zarządzanie całym procesem przez chmurę.

Drugim segmentem są urządzenia do małoseryjnej produkcji. Przedstawicielami tej grupy są np. Lisa firmy SinterIt oraz Fuse 1 firmy Formlabs są to urządzenia które mają ograniczone pole robocze oraz odmienne rozwiązania techniczne ale pozwalają na małoseryjną produkcję detali w technologii SLS.

W procesie spiekania SLM korzystne jest aby proszki miały sferyczne kształty, ponieważ ma to wpływ na kinetykę spiekania [6,100]. Proszki metaliczne do procesu SLM wytwarza się poprzez atomizację z drutu lub śrutu w gazie aby otrzymać sferoidalne cząstki proszku [88,100].

## 5. Ochrona przeciwpyłowa w procesach łoża proszkowego

Technologie laserowe mają szeroką gamę zastosowań, są to między innymi:

- cięcie,
- spiekanie,
- spawanie,
- znakowanie,
- ablacja,
- zabiegi medyczne wykorzystaniem lasera,
- drukowanie (2D poligrafia),
- grawerowanie.

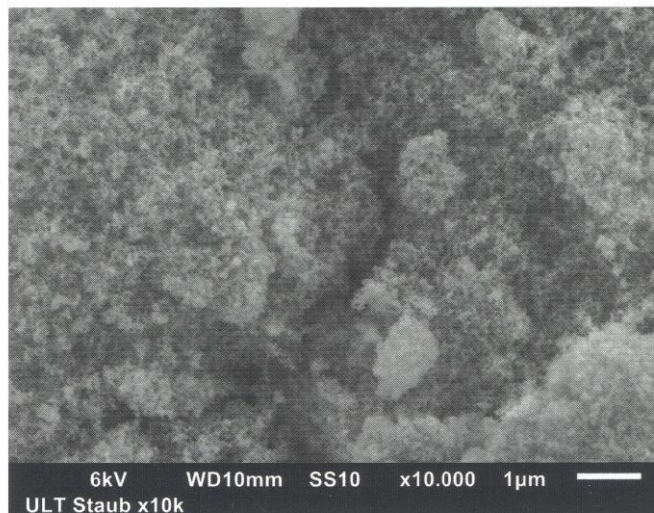
Ochrona przed oparami oraz drobnymi pyłami powstającymi przy procesach laserowych stała się poważnym wyzwaniem, ponieważ podczas procesów laserowych wytwarzają się bardzo szkodliwe opary.

Pomimo stosowanych systemów pozwalającym filtracji powietrza lub gazu w komorze, przy procesach spiekania laserowego stosuje się dodatkowe rozwiązania. Producenci urządzeń do procesów SLM np. stosują wewnętrzne lub zewnętrzne zespoły filtrujące (Rys. 5-1).



*Rys. 5-1 Dodatkowe zewnętrzne filtry (wyposażenie opcjonalne) w urządzeniu SLM 280 HL firmy SLM Solution [101]*

Zastosowane systemy mają na celu filtrację gazu, który jest podawany do komory podczas procesu spiekania oraz obniżanie się poziomu zapylenia podczas rozprowadzania kolejnych warstw proszku. Przepływ gazu powoduje przelatywanie przez strumień gazu najbliższych cząstek podczas rozprowadzania warstwy oraz w czasie procesu spiekania laserowego proszku.



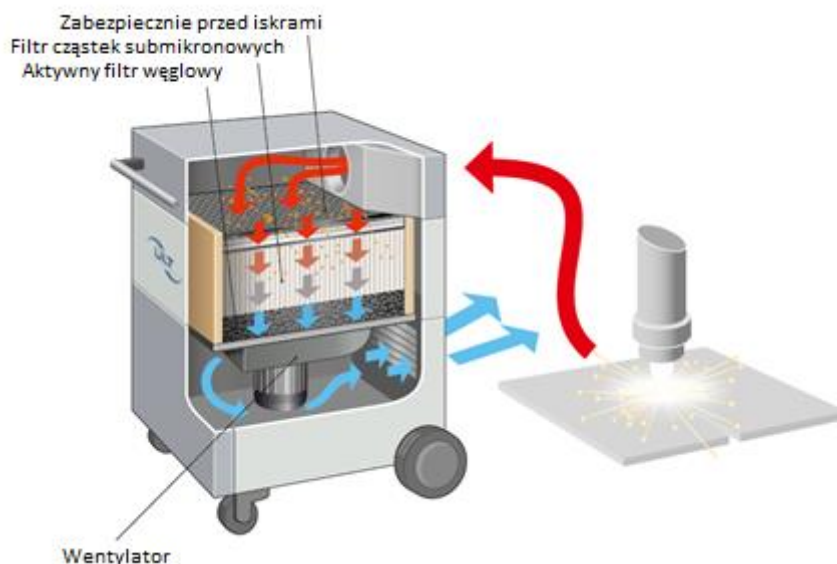
*Rys. 5-2 Nanocząstki proszku powstałe w procesie SLM [102]*



Wiodącym liderem na świecie w dostarczaniu systemów filtracji jest firma ULT AG Umwelt-Lufttechnik (ULT). Oferuje systemy filtracji powietrza dla wielu zastosowań, w tym systemów oczyszczania i filtracji powietrza przeznaczonych do procesów laserowych.

Badania prowadzone przez firmę ULT wykazały, że w procesach laserowych istotnym problemem stają się najmniejsze frakcje proszku (Rys. 5-2).

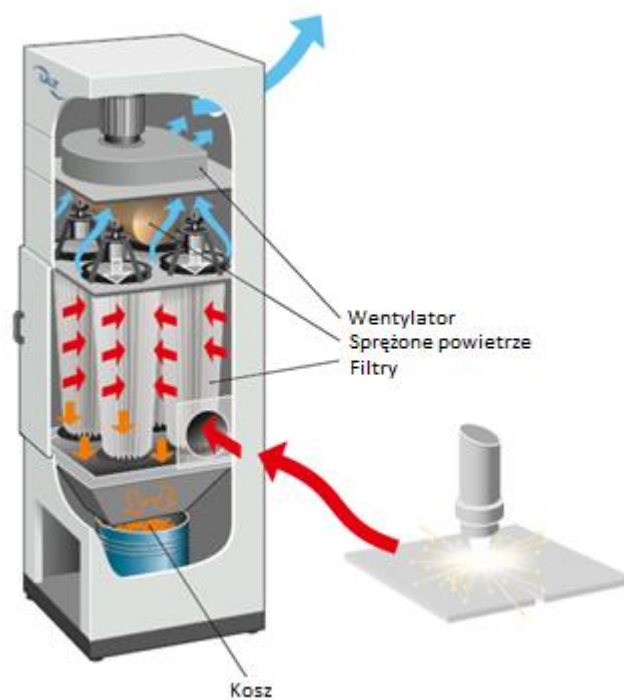
Systemy firmy ULT dzielą się na jednosekcyjne, gdzie filtracja odbywa się w objętości dedykowanego filtra (*Disposable filter units*). Zasadę działania takiego systemu przedstawia Rys. 5-3.



Rys. 5-3 Zasad działania filtra jednosekcyjnego (*Disposable filter units*) [102]

Systemy takie (jak na Rys. 5-3) są przeznaczone do procesów, które generują niskie stężenia oparów oraz zanieczyszczeń, mogących powodować powstawanie lepkich osadów.

Drugą grupę stanowią urządzenia z wielosekcyjnymi filtrami (*Cleanable filter units*) Rys. 5-4. Konstrukcja filtra pozwala na stosowanie w warunkach o dużo wyższych stężeniach oparów i pyłów niż filtry jednosekcyjne. Zastosowana duża objętość filtra wydłuża czas eksploatacji.



Rys. 5-4 Filtr przeznaczony do działania w warunkach o podwyższonej zawartości zapylenia (Cleanable filter units) [102]

## 5.1 Cząstki proszku podczas wytwarzania przyrostowego

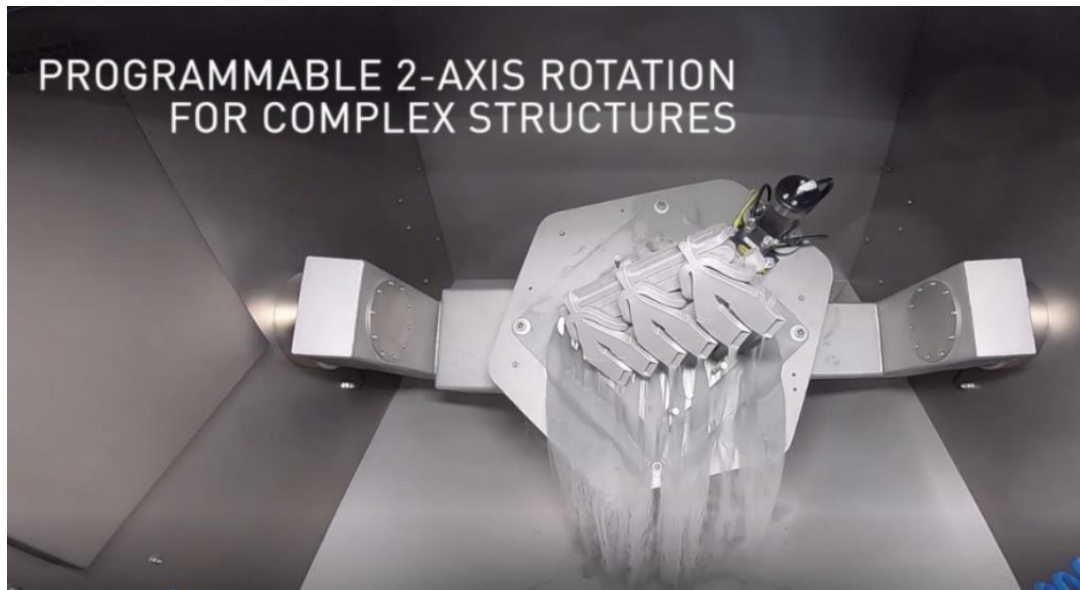
W technologiach PBF opary oraz pyły powstałe w procesie mogą wpływać niekorzystnie na operatorów, końcowy produkt, oraz na działanie urządzeń.

Podczas procesów PBF wytwarzane są [102]:

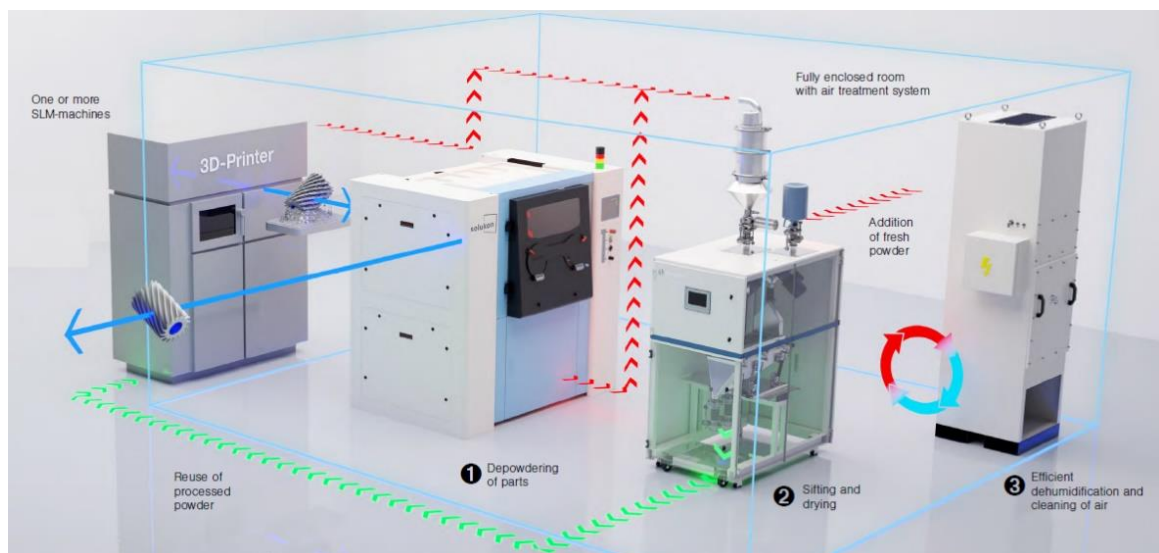
- Makropyły – wytwarzane głównie podczas obróbki wykańczającej. Zazwyczaj obróbka wykańczająca polega na usunięciu podpór oraz wykończeniu powierzchni do wymaganych gładkości.
- Nanopyły – czyli pyły o bardzo drobnym uziarnieniu wytwarzane podczas procesu topienia laserowego w postaci oparów.
- Zanieczyszczenia pyłami pochodzenia innego niż materiał budulcowy – np. cząsteczki kurzu powstałe w procesie piaskowania.
- Opary rozpuszczalników – wszystkich substancji używanych do czyszczenia urządzeń oraz odłuszczenia powierzchni (tj. aceton, benzyna ekstrakcyjna i inne).

Obecne trendy wskazują, iż dąży się do maksymalnego ograniczenia kontaktu z proszkiem. Systemem firmy AMP+ o nazwie „Automated & Clean Powder Processing” dedykowany do procesu SLM (Rys. 5-6), w którym zaimplantowano

- komorę do oczyszczania płyty bazowej (1) z niepieczonego proszku (Rys. 5-5)
- system przetrząsarki ultradźwiękowej (2), system filtrów (3)
- oraz transport pneumatyczny proszku.



Rys. 5-5 Komora urządzenia do oczyszczania płyty bazowej z niepieczonego proszku [103]



Rys. 5-6 System „Automated & Clean Powder Processing” firmy AMP+ [103]

W otaczającym nas powietrzu unoszą się różnego rodzaju cząsteczki, które powstają w wyniku procesów naturalnych jak i sztucznych (technologicznych). Można stwierdzić, że pył powstaje w wyniku [27]:

- procesów technologicznych, które wykorzystują pył jako jeden ze składników,
- transportu materiałów sypkich,
- produkcji i pakowania materiałów pylistych,
- rozdrabniania i kruszenia materiałów,
- spalania paliw,
- prac rolniczych,
- spawania, cięcia i innych procesów obróbki materiałów itp.

Powyższe zestawienie ma charakter ogólny i nie wyczerpuje wszystkich źródeł generujących pył w skali przemysłowej.

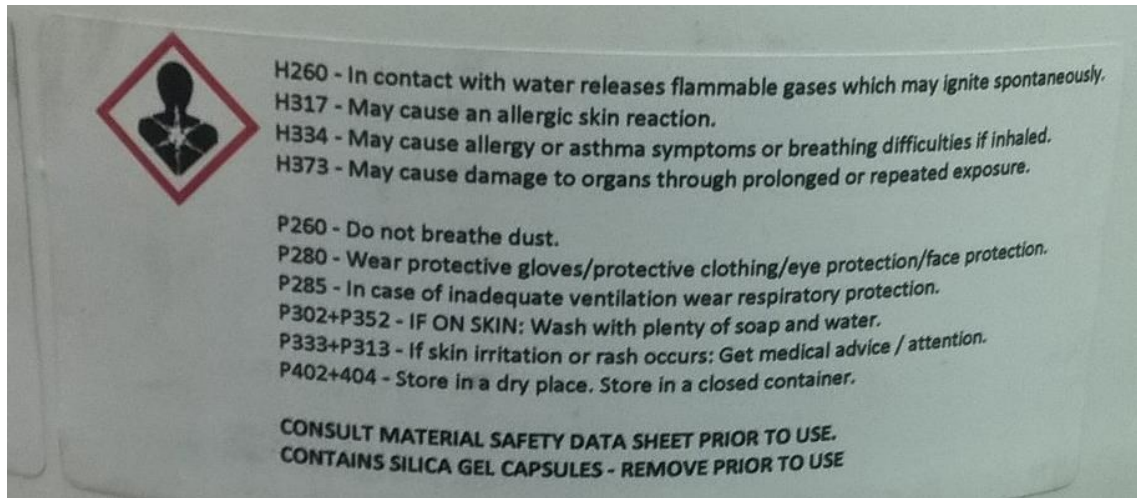
To jak pył oddziałuje na organizm człowieka zależy od stężenia pyłu, jego składu chemicznego oraz rozmiarów cząstek. Zazwyczaj frakcja wdychana to cząstki o wymiarach poniżej 100  $\mu\text{m}$ . W górnym odcinku dróg oddechowych (nos, jama istna, gardło, krtań) zatrzymywane są cząstki o wymiarach powyżej 30  $\mu\text{m}$ , a następnie wydalone ze śluzem.

Do środkowego odcinka dróg oddechowych (tchawica, oskrzela, oskrzeliki) przedostaje się frakcja płucna, której wymiar nie przekracza 20  $\mu\text{m}$ . Do obszaru wymiany gazowej (pęcherzyki płucne) dostają się cząstki o wymiarze poniżej 7  $\mu\text{m}$ . To one stanowią pył, który zalega dość długo i powoduje zmiany chorobowe. To jakie to będą zmiany zależy od charakteru pyłu, który został zaabsorbowany przez nasz organizm.

Wśród pyłów można wyróżnić pyły drażniące, uczulające, rakotwórcze, zwłókniające. Inny podział pokazuje typ pyłu jaki jest przyczyną choroby a więc, pylica azbestowa, krzemowa, berylowa, węglowa, itd. Oceniając stopień zagrożenia pyłami o działaniu pylico-twórczym obok czasu narażenia zasadnicze znaczenie mają [82]:

- poziom stężenia,
- stopień rozdrobnienia,
- zawartość wolnej krzemionki w pyle.

Warto zauważyć, że producenci proszków zwracają uwagę na bezpieczeństwo użytkownika dostarczonych proszków. Dowodem na to może być etykieta na pojemniku zawierającym proszek Ti-6AL-4V przeznaczony do procesu SLS/SLM (Rys. 5-7).



Rys. 5-7 Etykieta na beczce z proszkiem Ti-6AL-4V przeznaczonym do procesu SLM

## 5.2 Środki bezpieczeństwa osobistego przy procesach PBF

Podstawowe środki do ochrony bezpośredniej przy procesach łoża proszkowego:

- Rękawice – to standardowe rękawiczki lateksowe, zapewniające izolację od proszku. Rękawice pozwalają wykonywać precyzyjne operacje od wyciągnięcia elementu z objętości proszku, aż po prace związane z eksploatacją urządzenia.
- Maski pełnotwarzowe – chroni górne drogi oddechowe oraz oczy przed działaniem szkodliwych czynników. W masce aplikowane są zazwyczaj filtry klasy P3, co zapobiega przedostawaniu się drobnych pyłów oraz zapachów. Klasa filtru P3 zapewnia skuteczność filtracji na poziomie 99,95 % i jest stosowana do ochrony przed cząstkami stałymi i ciekłymi o wysokiej toksyczności, dla których  $NDS < 0,05 \text{ mg/m}^3$  [104]. Przykładem maski o podanych wyżej parametrach jest maska 3M VERSAFLO TR-315E+ Rys. 5-8 oraz Rys. 5-9.



Rys. 5-8 Maska pełnotwarzowa wraz z filtrem 3M VERSAFLO TR-315E+ [105]



Rys. 5-9 Pracownik podczas pracy w masce pełnotwarzowej VERSAFLO TR-315E+ [105]

- Kombinezon roboczy – izoluje inne części ciała od działania proszku metalicznego

Połączenie wszystkich środków ochrony zapewnia bezpieczeństwo pracownikom kosztem komfortu pracy z powodu dużego oporu oddechowego. Przykładowy strój przedstawia Rys. 5-10.

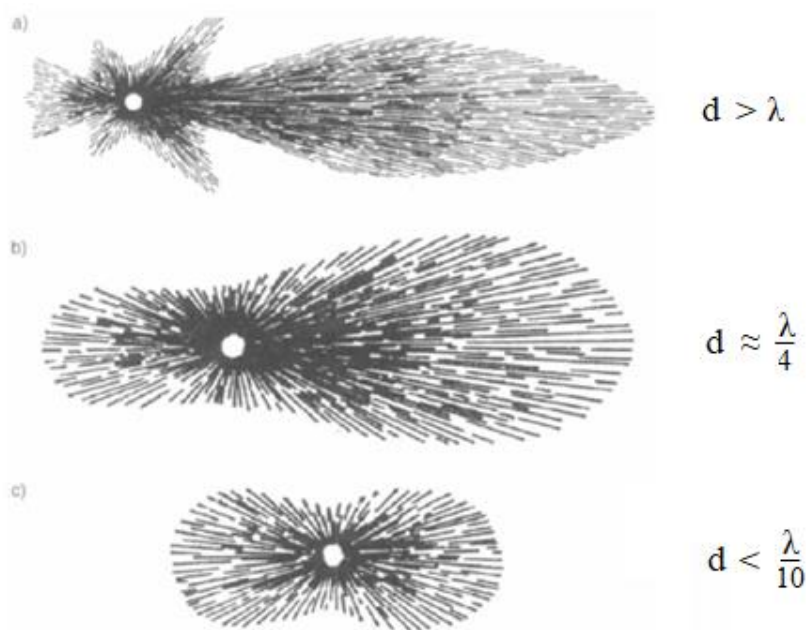


*Rys. 5-10 Pracownik wyposażony w maskę pełnotwarzową, rękawice oraz kombinezon podczas pracy przy urządzeniu pracującym w technologii łoża proszkowego (SLM) [106]*

## 6. Zjawiska występujące podczas pomiaru zapylenia

### 6.1 Rozpraszanie światła na pojedynczych cząstkach

Rozpraszanie światła w zależności od kształtu i rozmiaru cząstek wymusiło opracowanie różnych modeli rozpraszania światła. Rys. 6-1 przedstawia kątowy rozkład intensywności rozpraszania światła na idealnie sferycznych cząstkach o różnych rozmiarach według teorii Mie gdzie a) to cząstka większa od długości fali, b) to cząstka mniejsza o 1/4 niż długość fali, c) to cząstka mniejsza niż 1/10 długości fali.



Rys. 6-1 Rozpraszanie światła na sferycznych cząstkach o różnych wielkościach [107]

### 6.2 Badania Young'a - dyfrakcja Fraunhofera

Kluczowe rozważania prowadzące do potwierdzenia falowej natury światła zostały przeprowadzone przez angielskiego fizyka Thomasa Younga (1773-1829) [38].

Przed pojawieniem się lasera, generowanie wzoru dyfrakcyjnego było skomplikowanym i trudnym zadaniem, wymagającym posiadania urządzenia niezbędnego do

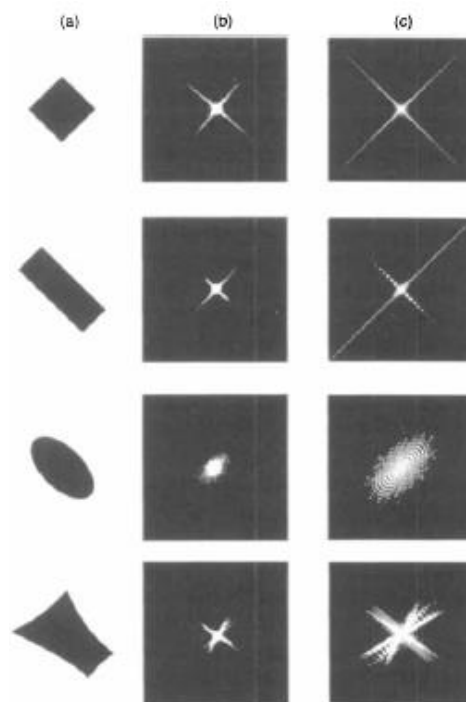


generowania światła monochromatycznego, oraz wyposażenia do badania wzorów dyfrakcyjnych. Obecnie generowanie wzorów dyfrakcyjnych nie jest skomplikowane, a urządzenia wykorzystujące zjawisko dyfrakcji laserowej są dostępne od wielu różnych firm [57,63,108].

Wzory dyfrakcyjne w których założono, że źródło światła jest w niekończonej odległości od obiektu, na którym dochodzi do rozproszenia światła oraz detektor znajdowały się w nieskończonej odległości od obiektu rozpraszającego. Znane są jako wzory dyfrakcyjne Fraunhofera.

Należy podkreślić, że przy omawianiu nieskończonych odległości w odniesieniu do drobnych cząstek, istotna jest ich liczba odniesiona do wielokrotności średnic cząstek. Jeśli cząsteczka ma jedynie 10  $\mu\text{m}$ , to kilkaset centymetrów jest w efekcie nieskończoną odległością).

Wzory dyfrakcyjne dla różnych kształtu cząstek oraz dwuwymiarową transformatę Fouriera pokazano na Rys. 6-2 [107].



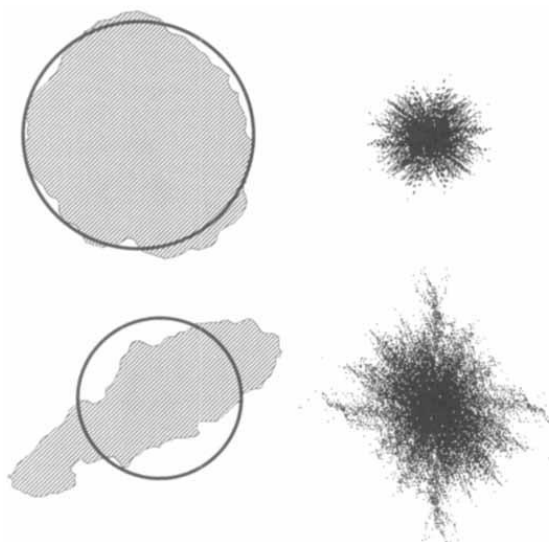
*Rys. 6-2 Rozpraszanie światła na cząstkach o różnych kształtach, a) kształt cząstki, b) wzór dyfrakcyjny (wyznaczony eksperymentalnie), c) dwuwymiarowa transformata Fouriera (obliczona matematycznie) [107]*

Wzorce dyfrakcyjne Fraunhofera zostały nazwane na cześć Josepha Fraunhofera, niemieckiego fizyka, który wynalazł siatkę dyfrakcyjną. Można wykazać, że wzory

dyfrakcyjne Fraunhofera są takie same jak dwuwymiarowe transformacje Fouriera, dla określonych kształtów cząstek. Na Rys. 6-2 obliczono dwuwymiarową transformatę Fouriera dla czterech przedstawionych kształtów.

Jedną z cech, na którą należy zwrócić uwagę we wzorach pokazanych na Rys. 6-2 jest to, że obecność ostrej krawędzi powoduje dyfrakcję energii w dużej odległości od środka wzoru. Jest to istotne przy określaniu dokładności rozmiaru cząstek za pomocą urządzeń wykorzystujących zasadę dyfrakcji laserowej, ponieważ praktycznie wszystkie komercyjne urządzenia interpretują wzór dyfrakcyjny z założeniem, iż cząstki posiadają idealnie kulisty kształt [107].

Pojawienie się ostrych krawędzi na profilach powoduje, że równoważny rozmiar sfery jest mniejszy niż rozmiar fizyczny cząstki Rys. 6-3 [107].



*Rys. 6-3 Cząstki proszku o różnych kształtach odniesione do średnicy projekcyjnej oraz ich dwuwymiarowa transformata Fouriera [107]*

Dla cząstek o średnicy zbliżonej do długości fali świetlnej obliczenia są znacznie bardziej skomplikowane i konieczne jest wówczas zastosowanie teorii Mie [107].

### **6.3 Rozpraszanie Mie**

Przy cząstkach zbliżonych do długości fali oświetlacza obliczenia są znacznie bardziej złożone i konieczne jest użycie uogólnionej teorii rozpraszania światła opracowanej

przez naukowca Gustava Mie [42]. Należy podkreślić, że teoria Mie odnosi się do idealnie sferycznych cząstek [109].

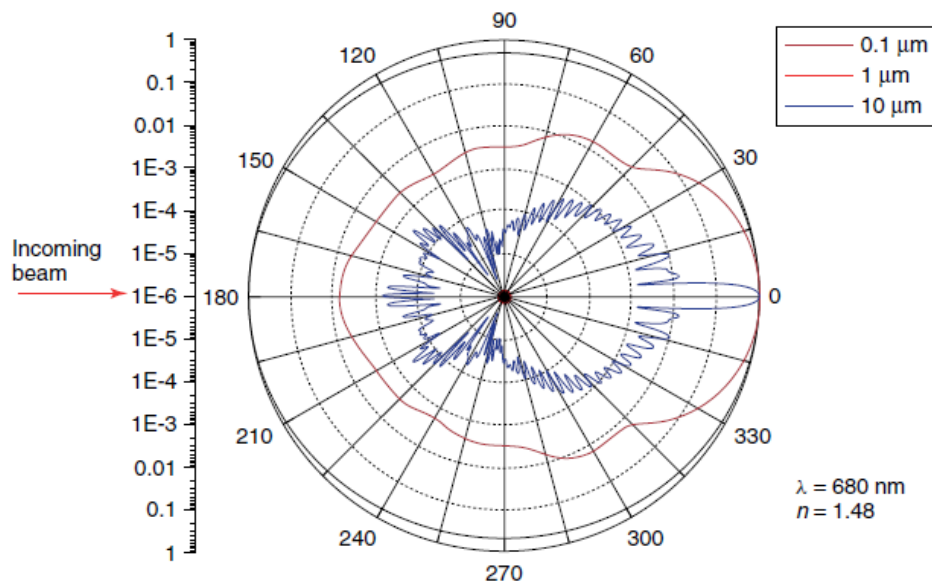
Jego oryginalna praca została opublikowana w 1908 roku. Teoria ta jest szczegółowo omówiona w kilku pozycjach literaturowych [3-71]. Rozpatrując rozpraszanie światła według teorii Mie, należy posługiwać się pojęciem zespolonego, optycznego współczynnika załamania światła.

Teoria Mie zajmuje się rozpraszaniem wprzód wiązki światła poruszającej się do detektora, znajdującej się w nieskończenie dużej odległości od oświetlanej cząstki.

Aby opisać rozpraszanie wiązki światła przez cząstkę wykorzystuje się parametr znany jako współczynnik ekstynkcji dla rozpraszającego materiału. Współczynnik ekstynkcji określa łączne efekty rozpraszania i pochłaniania światła.

Współczynnik rozpraszania składa się z dwóch składowych - jedna związana jest z geometrycznymi i optycznymi parametrami cząstek, a druga opisuje kątowy rozkład rozproszonego światła [107].

Jednym ze sposobów przedstawiania rozpraszania światła jest wykres biegunowy. Zaprezentowany na Rys. 6-4. Przedstawia on biegunowy rozkład rozpraszanej energii (w skali logarytmicznej) dla różnych rozmiarów idealnie okrągłych cząstek [38].



Rys. 6-4 Rozkład rozpraszanej energii dla różnych rozmiarów idealnie okrągłych cząstek [38]

W miarę jak wielkość cząstek zbliża się do długości fali światła, zwiększona ilość światła jest rozpraszana pod kątem prostym, do kierunku padającej wiązki. Jest to jeden

z powodów, dla których dyfraktometry przeznaczone do badania cząstek mniejszych niż 1 lub 2  $\mu\text{m}$  wykorzystują w swoich pomiarach światło rozproszone bocznie [107].

## **6.4 Rozpraszanie Rayleigha**

W przypadku kiedy cząstki są znacznie mniejsze niż długość fali oświetlacza można stosować odmienną teorię rozpraszania światła. Teoria rozpraszania światła na cząstkach mniejszych niż długość fali oświetlacza to teoria Rayleigha - Johna Williama Strutta (Lorda Rayleigha) [107].

## 7. Półprzewodnikowe detektory promieniowania

Aby materiał był zdalny do praktycznego wykorzystania jako detektor powinien spełniać następujące wymagania [110]:

- czas życia ładunków musi być dłuższy od ich zbierania,
- ruchliwość nośników powinna być wystarczająco duża aby zapewnić jak najkrótszy czas zbierania ładunku,
- pomimo wysokich wartości natężenia pola elektrycznego prąd tła (upływu) powinien być bliski zeru,
- energia wymagana do otrzymania pary elektron-dziura powinna być mała, aby móc osiągnąć wysoką rozdzielczość.

Podstawowe warunki spełniają spolaryzowane złącza typu p-n. Generacja nośników ładunku zachodzi pod wpływem promieniowania w warstwie zaporowej złącza, z której są przemieszczane na wskutek działania pola elektrycznego oraz zbierane na elektrodach zewnętrznych. Zebrany ładunek jest proporcjonalny do energii zaabsorbowanej w warstwie zaporowej [110].

Typowymi materiałami do wytwarzania diod typu p-i-n są Si, Ge oraz InGaAs, przy czym odchodzi się od stosowania diod Ge, zastępując je diodami z InGaAs ze względu na mniejszą wartość prądu ciemnego, większą szybkością odpowiedzi oraz wyższą czułością prądową [37].

Warto wspomnieć o dwóch rodzajach detektorów półprzewodnikowych: typu p-n oraz p-i-n. Technologia ich wykonania jest zależna od wymagań.

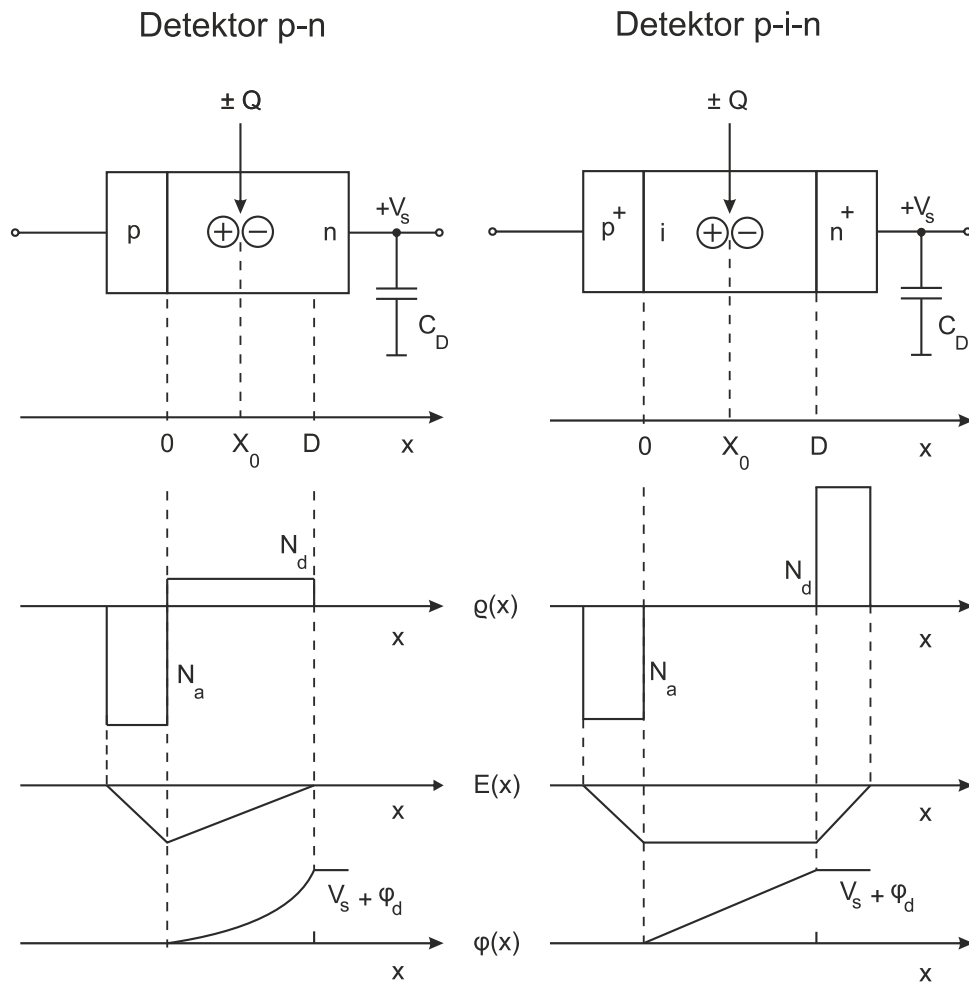
Detektory typu p-n jako detektory z barierą powierzchniową, gdzie w obszarze typu n uformowana jest mikrowarstwa typu p, lub detektory dyfuzyjne, w których złącze p-n wytwarzane jest w procesie dyfuzji domieszek donorowych.

Detektory p-i-n charakteryzują się szeroką warstwą pośrednią, zwaną warstwą „i” (od ang. *intrinsic*) przedzielającą obszar p oraz n. Warstwa pośrednia jest formowana na drodze dryfowania jonów litu [110]. Z tego powodu detektory te nazywane są litowymi [37].

Odmiennie struktury diody p-n oraz p-i-n pociągają za sobą odmiennie przebiegi rozkładu ładunku przestrzennego  $\zeta(x)$ , natężenia pola elektrycznego  $E(x)$  oraz potencjału  $\varphi(x)$ , co przedstawia Rys. 7-1 [110].

Warto wspomnieć, iż obecnie największym ograniczeniem dla detektorów p-i-n jest pojemność złącza, która jest barierą jeśli chodzi o szybkość odpowiedzi. Do układów o dużo wyższych częstotliwościach (GHz) stosuje się fotodiody MSM (*Metal-Semiconductor-Metal*) zapewniające małą pojemność złącza i znacznie szybszy czas odpowiedzi, niż detektory p-i-n. W zależności od zastosowania diody p-i-n mogą mieć różną budowę.

Promieniowanie może dostawać się poprzez wytrawiony otwór w górnej części struktury lub poprzez wytrawioną część podłoża. Istnieją również rozwiązania pozwalające na docieranie promieniowania z boku struktury bezpośrednio do warstwy „i”, rozwiązania takie dedykowane są współpracy ze światłowodami jednomodowymi [37].



Rys. 7-1 Przebiegi rozkładu ładunku przestrzennego  $\rho(x)$ , natężenia pola elektrycznego  $E(x)$ , oraz potencjału  $\varphi(x)$ , dla detektora typu p-n oraz p-i-n,  $N_d$  – koncentracja donorów w warstwie n,  $N_a$  – koncentracja akceptorów w warstwie p [110]

## 7.1 Detektor typu p-n

Detektor p-n jest niesymetrycznym złączem p-n, charakteryzującym się skokowym przejściem z obszaru p do obszaru n, spolaryzowanym zaporową napięciem  $V_s$  (Rys. 7-1 detektor p-n). Warstwa p spełnia rolę okienka dla promieniowania, przez co musi być odpowiednio cienka. Strefa detekcji rozciąga się w strefie półprzewodnika typu n na głębokość równą szerokości bariery D (Rys. 7-1). Swobodne nośniki ładunku wygenerowane pod wpływem działania promieniowania w warstwie zaporowej przenoszone są w kierunku elektrod zbiorczych kosztem energii pola elektrycznego, zależnego od napięcia polaryzacji  $V_s$  oraz energii ładunku przestrzennego złącza [110].

## 7.2 Detektor typu p-i-n

W przypadku detektora p-i-n szerokość strefy detekcji jest zależna od szerokości warstwy „i” (Rys. 7-1 detektor p-i-n). Strefa detekcji jest praktycznie niezależna od napięcia polaryzacji. Z procesu formowania warstwy i wynika, że zachodzi w niej kompensacja donorów i akceptorów. Powodując utrzymywanie jednorodnego pola elektrycznego, wytworzonego pod wpływem napięcia polaryzującego (Rys. 7-1 detektor p-i-n). Detektor p-i-n można traktować jako kondensator płaski, którego okładki są wysoko domieszko- wane obszary  $p^+$  i  $n^+$  o równomiernych rozkładach gęstości donorów i akceptorów. Z tego powodu czasami nazywa się również tego typu detektory „detektorami o jednorodnym polu” [110].

## 7.3 Tryby działania detektorów promieniowania

Biorąc pod uwagę zasadę działania detektorów oraz obwodów które przetwarzają pozyskany z nich sygnał możemy podzielić je na układy działające w trybie [111]:

- prądowym,
- napięciowym.

### **7.3.1 Tryb napięciowy**

W trybie napięciowym impuls prądowy zostaje scałkowany w zewnętrznym obwodzie wejściowym, a następnie jest wzmacniany jako wtórny impuls napięciowy o zmodyfikowanym przebiegu czasowym [111].

### **7.3.2 Tryb prądowy**

W trybie prądowym układ wzmacnia sygnał i przekazuje na wyjście sygnał prądowy bez znaczących zniekształceń sygnału. Odpowiedź napięciowa na wyjściu układu zachowuje niezmienny kształt, w porównaniu do prądowego sygnału wejściowego. Wymogiem poprawnego działania takiego układu jest niska rezystancja wejściowa detektora. W tym przypadku tryb prądowy zwany jest trybem wiernoprądowym (*true current mode*) lub trybem semi-prądowym (*semi-current mode*) [111].



## 8. Źródła i rodzaje szumów w układach elektronicznych

Za najbardziej znaczące w układach elektronicznych uważa się szумы: termiczne, śrutowe, generacyjno-rekombinacyjne, szумы rozdziału oraz szумы nadmiarowe ( $1/f$ ) [111].

- Przyczyną szumu termicznego (*thermal noise*, zwanego także szumem Johnsona) - są przypadkowe zderzenia nośników ładunku z siecią krystaliczną [111–113].
- Szum śrutowy (*shot noise*, zwanego także szumem Schottky'ego) - powstaje w efekcie przypadkowych przejść nośników ładunku przez barierę potencjału, jak również w wyniku emisji przypadkowej elektronów lub fotonów [111–113].
- Szумы fotoemisji oraz emisji wtórnej [114,115] - są wynikiem zmian statystycznych obu tych procesów stochastycznych. Szum emisji fotoelektrycznej posiada wszystkie cechy szumu śrutowego [111–113].
- Szum lawinowy - występuje w złączach spolaryzowanych zaporowo, na przykład w diodach Zenera lub fotodiodach lawinowych [116]. Prąd generowany podczas przebicia lawinowego składa się z wielu impulsów prądowych. Szумы lawinowe, podobnie jak szумы śrutowe, zależą od natężenia prądu płynącego przez złącza [111–113].

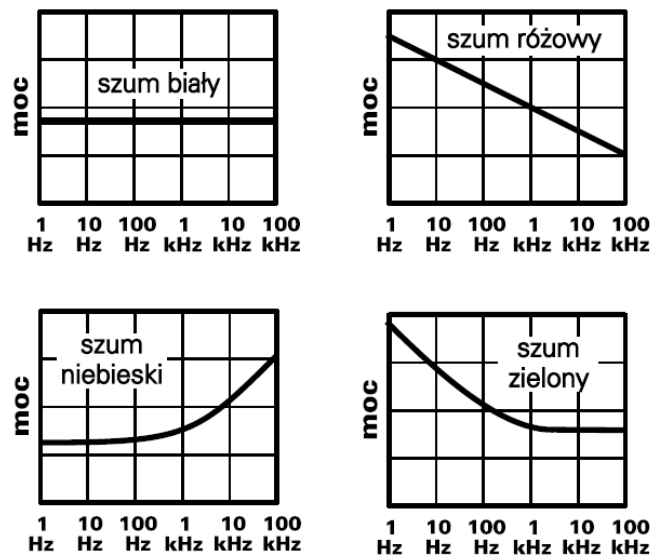
W przypadku szumu nadmiarowego nie można wskazać uniwersalnego mechanizmu jego powstawania. Liczne modele tłumaczą to zjawisko dla konkretnych elementów lub przyrządów elektronicznych. Wspólną cechą szumów nadmiarowych jest ich charakterystyka widmowa typu  $1/f^n$ , dlatego też często stosuje się nazwę określającą szумы tego rodzaju jako szумы „ $1/f$ ”, lub „szумы kolorowe”.

Jako przykłady szumów  $1/f$  możemy wyróżnić [113]:

- Szumy migotania (*flicker noise* inaczej zwane szumami nadmiarowymi *excess noise*) - wywoływane zmianami prądu powodowanymi przez defekty występujące w strukturze materiału półprzewodnikowego [111,112].
- Szumy wybuchowe (*popcorn noise*) - powstają natomiast na skutek obecności w materiale półprzewodnikowym zanieczyszczeń w postaci jonów metali [113].
- Szum generacyjno-rekombinacyjny - tworzą przypadkowe procesy generacji i rekombinacji par dziura-elektron [111].

W zależności od spektralnego rozkładu mocy (PSD, *Power Spectral Density*) można określić charakter szumu. W literaturze specjalistycznej często szumy o charakterze  $1/f$  określa się mianem szumu różowego lub *flicker noise* nie uwzględniając pochodzenia szumów, a jedynie określając iż widmowa gęstość mocy zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości [112].

Nazwy zwyczajowe szumów oraz gęstość mocy w domenie częstotliwości przedstawia Rys. 8-1.



Rys. 8-1 Przykłady szumów kolorowych oraz ich zwyczajowych nazw [112]

Ilość oraz rodzaj poszczególnych szumów są uwarunkowane typem układu oraz elementami składowymi obwodu. W przypadku detekcji sygnałów optycznych kluczową rolę odrywają dwa rodzaje szumów: szum termiczny oraz szum śrutowy, a przy detekcji sygnałów niskiej częstotliwości szum nadmiarowy ( $1/f$ ) [111].

## 8.1 Szumy termiczne w rezystorach

Poziom szumu w rezystorze zazwyczaj jest wyrażany w mV/V, lub w decybelach dB jako wskaźnik szumu [NI] dB co określa równanie ( 8-1).

$$dB[NI] = 20\log\left[\left(\frac{u}{U}\right) \cdot 106\right]$$

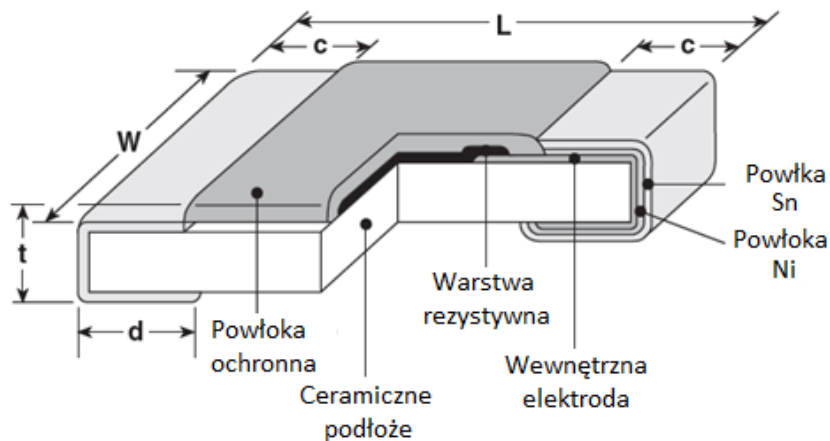
( 8-1)

gdzie:  $u$  - jest średnią kwadratową napięcia szumu na dekadę częstotliwości,  
 $U$  - jest spadkiem napięcia stałego na rezystorze [117].

W rezystorach węglowych lub cienkowarstwowych wykonanych z mieszanek materiałów poziom szumu prądowego jest najwyższy Rys. 8-2. Rezystory cienkowarstwowe Rys. 8-3 wykazują mniejsze szumy dzięki znacznie bardziej jednorodnej strukturze naniesionego materiału. Najmniejsze szumy obserwuje się w rezystorach foliowych oraz drutowych [117].

[NI] dB	-40	-30	-20	-10	0	10
<b>Rezystory dyskretne</b>						
Z masy węglowej						
Z węgla nanoszonego						
Z folii metalicznej						
Drutowe						
<b>Rezystory zintegrowane</b>						
Cienkowarstwowe						
Grubowarstwowe						

Rys. 8-2 Porównanie właściwości szumowych wybranych rezystorów [117]

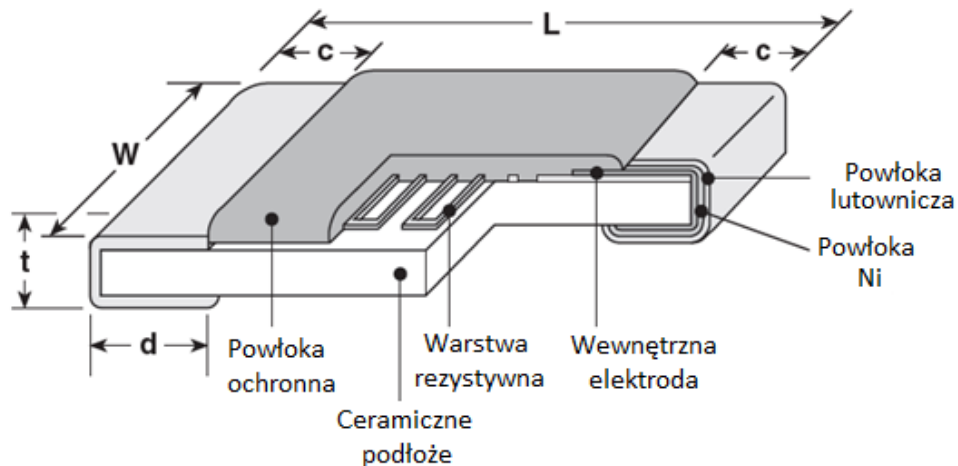


Rys. 8-3 Schemat cienkowarstwowego rezystora węglowego [118]

W rezystorach drutowych szum powstaje na styku drutu z końcówką. W przypadku rezystorów foliowych końcówki są elementami tej samej folii, więc nie ma problemu styku. Wadą rezystorów drutowych jest indukcyjność własna wpływająca na impedancję rezystora [117].

Rezystory foliowe wykonywane są w procesie trawienia chemicznego folii metalicznej w kształcie równoległych bliskich ścieżek, których indukcyjność się znosi. Rezystory foliowe są stosowane w wysokiej klasy sprzęcie audio [117].

Pośrednim rozwiązaniem jest stosowanie rezystorów cienkowarstwowych metalizowanych (Rys. 8-4) gdzie cienka warstwa metaliczna jest napyła na podłoże, a materiał jest usuwany przy pomocy obróbki laserowej. Dzięki takiemu zabiegowi możemy otrzymać precyzyjne rezystory o niskim poziomie szumu.



Rys. 8-4 Schemat precyzyjnego, cienkowarstwowego rezystora metalizowanego [119]

Jak widać z Rys. 8-4 rezystory składają się z materiału rezystywnego oraz konektorów wykonanych z miedzi pokrytych cienką warstwą innego metalu. Dwa odmienne przewodniki tworzą termoparę, która wytwarza napięcie w wyniku efektu Seebecka. Napięcie to może wynosić około  $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  dla połączenia miedź/nichrom, a dla rezystora węglowego może przekroczyć  $400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  [120]. Co może powodować błędy przy pomiarach małych sygnałów.

## 8.2 Zakłócenia w kondensatorach

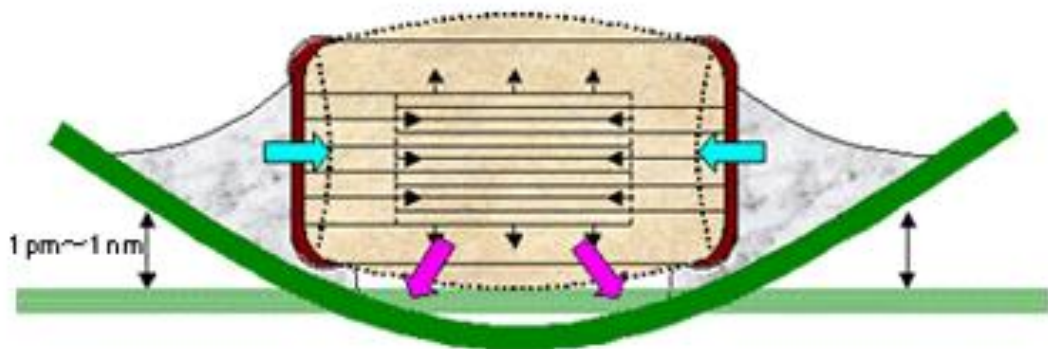
Wibracje płytki drukowanej (PCB, *Print Circuit Board*) mogą powodować przeniesienie wibracji na kondensatory w układzie. Poprzez zastosowanie w kondensatorach dielektryka, mającego cechy piezoelektryczne, przy małych sygnałach może dochodzić do powstawania dodatkowych zniekształceń oraz zakłóceń w torze sygnału.

W zaproponowanym rozwiązaniu autorskiego sensora zastosowano wentylator, który może przenosić drgania na całą konstrukcję.

Wielowarstwowe kondensatory ceramiczne (MLCC) wykorzystują ferroelektryczny dielektryk, którego zastosowanie powoduje podstawienie efektu piezoelektrycznego.

Zjawisko wibracji kondensatora w zakresie częstotliwości akustycznych jest nazywane „szumem akustycznym” (*acoustic noise*) [121].

Zjawisko „szumu akustycznego” w kondensatorach ceramicznych obejmuje wibracje o amplitudzie od 1 pm do 1 nm. Nie uważa się, aby wibracje stwarzały problemy z niezawodnością kondensatorów ceramicznych lub innych elementów znajdujących się w sąsiedztwie [121].



Rys. 8-5 Oddziaływanie wibracji przenoszonych z płytki PCB na kondensator MLCC [121]

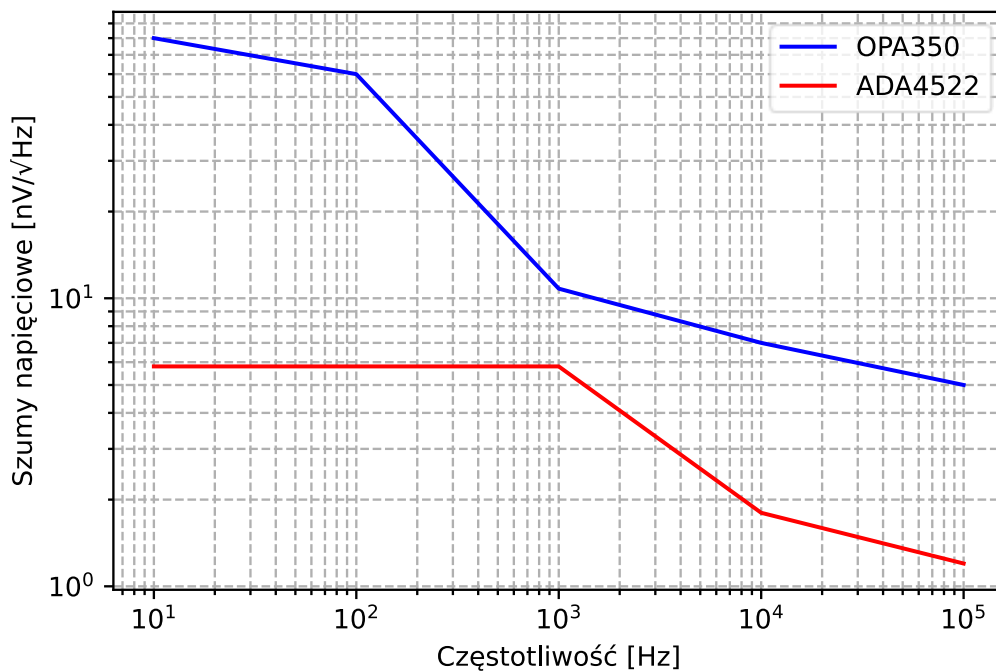
Efekt piezoelektryczny w kondensatorach ceramicznych nie jest generowany jedynie pod wpływem przyłożonego napięcia, ale również co bardziej istotne podczas wibracji lub nacisku na materiał, z którego zbudowany jest kondensator [121].

Drgania płytki PCB przenoszone są na kondensator i powstaje napięcie w objętości dielektryka, który posiada cechy piezoelektryczne (Rys. 8-5). Odkształcenia płytki prowadzą do zmęczenia połączenia lutowanego, co wraz z efektem Kirkendalla [122] może powodować pęknięcia spoiwa lutowniczego.

Kompromisem między rozmiarami a parametrami są kondensatory z dielektrykiem C0G, zwanym również NP0. Kondensatory z dielektrykiem C0G produkowane są do montażu powierzchniowego oraz co ważniejsze wykazują najmniejszy efekt piezoelektryczny wśród kondensatorów ceramicznych o małych rozmiarach (przeznaczonych do montażu powierzchniowego). Dodatkowo, dzięki cechom dielektryka kondensatory powodują małe zniekształcenia sygnału oraz małą zależność pojemności od przyłożonego napięcia [123].

### 8.3 Wzmacniacz z przetwarzaniem sygnału

Jednym z rozwiązań problemów szumów w układach niskiej częstotliwości jest zastosowanie wzmacniacza z przetwarzaniem (*chopper amplifier*) [112], (zwanego także z przemianą sygnału [124]). Pozwala to uzyskać płaską charakterystykę szumów napięciowych w szerokim zakresie częstotliwości w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami bez przetwarzania co jest widoczne na (Rys. 8-6).



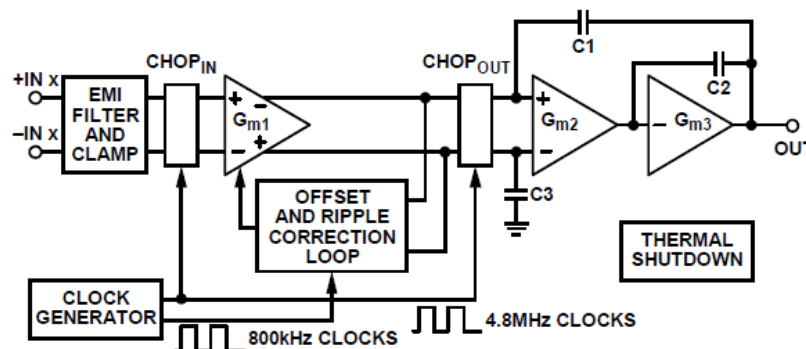
Rys. 8-6 Poglądowa spektralna gęstość mocy szumów dla wzmacniacza z przetwarzaniem ADA4522 oraz wzmacniacza OPA350 (bez przetwarzania) [125,126]

Układ wzmacniacza z przetwarzaniem (Rys. 8-7) składa się z:

- filtru wejściowego i obwodów zabezpieczających wejście wzmacniacza,

- trzech stopni wzmacnienia  $G_{m1}$ ,  $G_{m2}$  i  $G_{m3}$ ,
- wejściowego i wyjściowego układ przetwarzania amplitudowego ( $CHOP_{IN}$  i  $CHOP_{OUT}$ ),
- generatora zegarowego,
- obwodu sprzężenia zwrotnego,
- obwodu kompensacji tętnień wynikających z przełączania wzmacniacza.

Kondensatory C1, C2 i C3 służą do filtrowania przetworzonego sygnału [126].



Rys. 8-7 Schemat działania wzmacniacza z przetwarzaniem ADA4522-1 [126]

Bloki  $CHOP_{IN}$  i  $CHOP_{OUT}$  (przemiany amplitudowej) są sterowane generatorem z częstotliwością 4,8 MHz. Wejściowy sygnał jest modulowany przez blok  $CHOP_{IN}$ , a następnie w bloku  $CHOP_{OUT}$  jest demodulowany co powoduje zmniejszenie się napięcia niezrównoważenia do poziomu kilku miliwoltów [126].

Zastosowanie wzmacniacza zmiennoprądowego po blokach przemiany amplitudowej umożliwia osiągnięcie w nieskomplikowany sposób wysokiej stabilności wzmacnienia oraz zniwelowanie szumów w zakresie niskich częstotliwości.

Wadą wzmacniacza z przetwarzaniem jest powstawanie na wyjściu szumów powstających na skutek modulacji sygnału sygnałem prostokątnym [126].

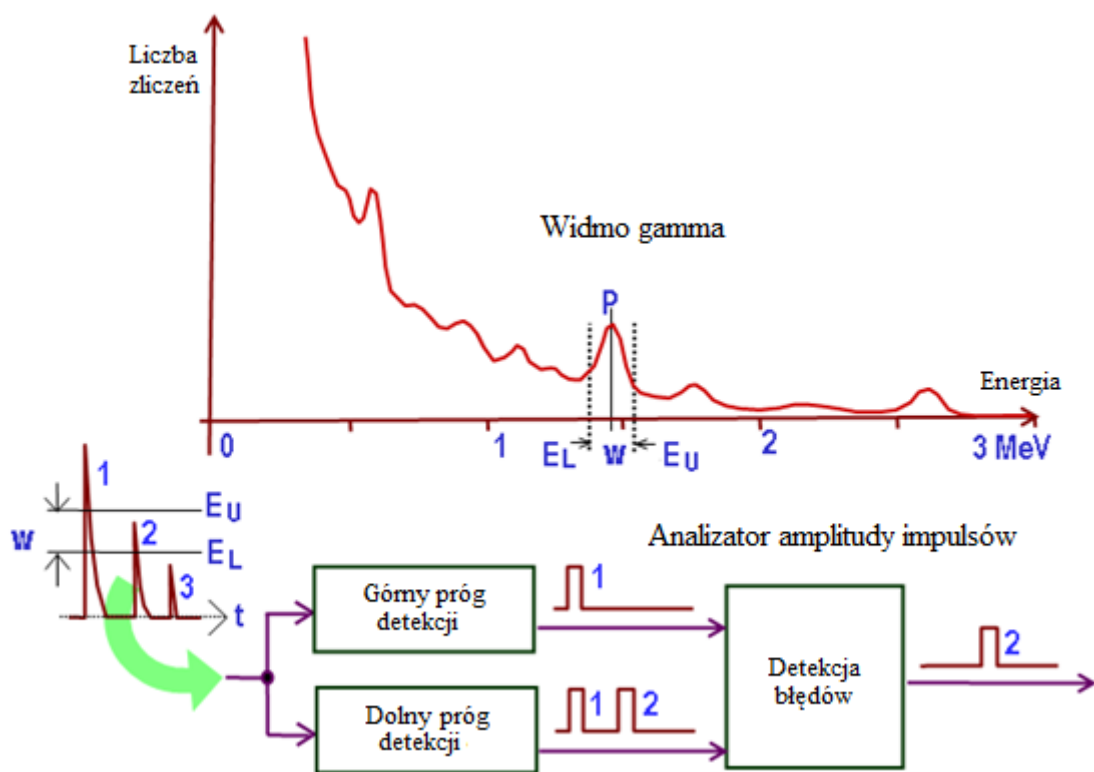
## 8.4 Wybrane metody detekcji sygnałów optycznych

### 8.4.1 Detekcja bezpośrednia

Metoda detekcji bezpośredniej polega na bezpośrednim pomiarze impulsów określając umowne poziomy sygnałów, zazwyczaj górny oraz dolny poziom (okna wyzwalań). Metod ta wykorzystywana jest w licznikach scyntylicyjnych. Przykładem urządzenia

wykorzystującego detekcję bezpośrednią może być analizator wielokanałowy (Rys. 8-8, MCA, *multichannel analyzer*), gdzie poszczególne amplitudy impulsów są zliczane oraz przyporządkowywane do wartości danego kanału umożliwiając wykreślanie histogramu z zebranych impulsów. Układ zawiera również rozwiązanie niwelujące wpływ błędnych zliczeń i nakładania się impulsów na siebie. Rozwiązanie takie jest stosowane w rozbudowanych licznikach promieniowania jonizującego oraz licznikach cząstek wysokich energii [127,128].

Jedną z metod dodatkowo polepszających stosunek S/N możliwą do zastosowania w układzie z dynamicznym całkowaniem jest pomiar sygnału użytecznego z szumem oraz pomiaru szumu samego tła i odjęcie tych dwóch wartości (*background subtraction*) [111].



Rys. 8-8 Schemat działania analizatora wielokanałowego MCA [128]

W praktycznych aplikacjach tej metody najważniejsze jest określenie progu detekcji oraz poziomu promieniowania tła.

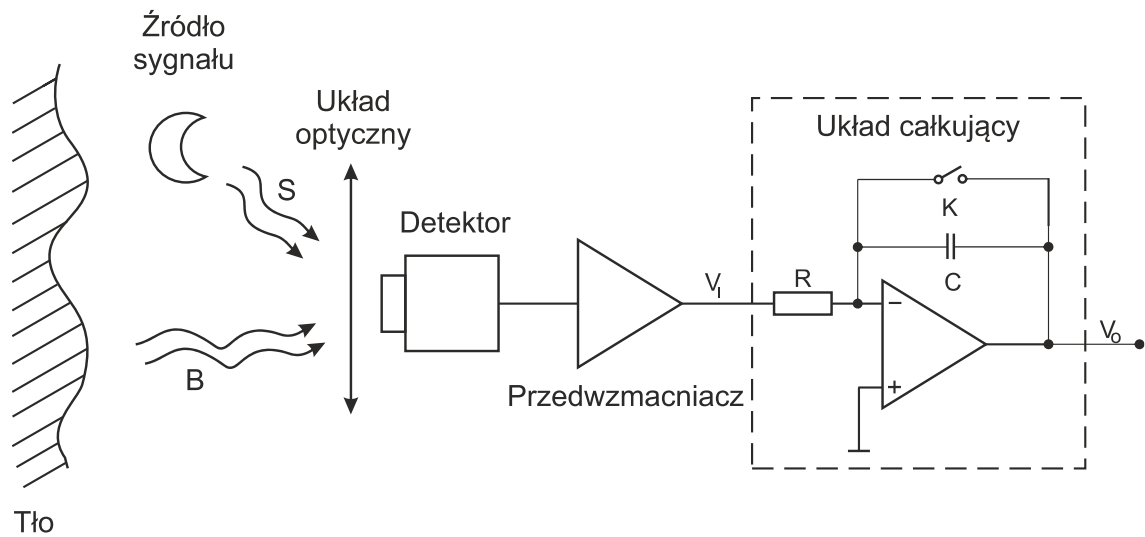
#### 8.4.2 Układ z dynamicznym całkowaniem

Jedną z prostszych metod do detekcji jest zastosowanie układu z dynamicznym całkowaniem (*boxcar detector, boxcar averagers*). Metoda ta stosowana jest do detekcji



sygnałów akustycznych [129] oraz optycznych [130–132]. Przeznaczona jest do pomiarów sygnałów o małym natężeniu, w obecności szumów [37].

Na wejście detektora podawany jest mierzony sygnał wraz z szumem Rys. 8-9, a następnie sygnał z przedwzmacniacza trafia na układ całkujący. W zależności od rozwiązania układ może synchronicznie całkować zgodnie z jego z okresem (*static gate*) lub może być synchronizowany z modulacją oświetlacza (*dynamic gate*) jeśli jest to możliwe w układzie.



Rys. 8-9 Schemat układu detekcji z dynamicznym całkowaniem [37]

Stosunek S/N nie zależy od stałej czasowej całkowania. W praktycznych aplikacjach najważniejsze jest określenie progu detekcji oraz ustalenie czasu całkowania oraz okresu danego sygnału.

## 9. Filtracja sygnałów

### 9.1 Filtry analogowe

Szumy oraz zniekształcenia zawarte w sygnale wejściowym mogą prowadzić do błędów pomiarowych oraz niestabilności działania układu. Szumy oraz zniekształcenia w sygnale uniemożliwiają ustalenie stałego poziomu detekcji oraz poziomu promienia tła, co jest bardzo istotnym czynnikiem. W zależności od potrzeby możemy stosować filtry analogowe, czyli z zastosowaniem elementów dyskretnych, lub cyfrowe (zaimplementowane w oprogramowaniu).

Najczęściej zadaniem filtru jest tłumienie niepożądanych częstotliwości sygnału w zadanym paśmie częstotliwości.

Najważniejszymi parametrami filtrów są: górna oraz dolna częstotliwość graniczna oraz rząd filtru, który jest niczym innym, jak stromością opadania charakterystyki w funkcji częstotliwości określaną w decybelach na oktawę (dB/dek) lub częściej w decybelach na dekadę (dB/okt). Ostatnim istotnym parametrem filtrów jest dobroć, określana jako stosunek częstotliwości środkowej filtru do szerokości jego pasma.

Najczęściej używane filtry analogowe w praktyce to filtr Bessela, Chybyshewa oraz Butterwortha [112]. Nazwa filtru nie wskazuje na sposób realizacji filtru, a jedynie na sposób działania.

#### 9.1.1 Filtr Bessela

W niektórych przypadkach istotne jest, aby filtr nie wносił zniekształceń do sygnału, który przetwarza. W celu zachowania jak najmniej zniekształconego sygnału (zgodnie z przekształceniem Fouriera) należy zachować amplitudy poszczególnych składowych sygnału oraz ich fazy.

Jeżeli kluczowym parametrem dla filtru jest płaska charakterystyka opóźnienia grupowego, to naturalnym wyborem jest zastosowanie filtru Bessela. Niestety filtr Bessela pomimo płaskiej charakterystyki opóźnienia grupowego posiada mniejszą stromość w pasmie zaporowym niż inne filtry [112,133,134].

### 9.1.2 Filtr Butterwortha

Jeśli wymagane jest aby charakterystyka filtru w całym pasmie przenoszenia była jak najbardziej płaska, optymalnym wyborem jest zastosowanie filtru Butterwortha. Filtr Butterwortha posiada bardziej stromą charakterystykę niż filtr Bessela, ale niestety jego opóźnienie grupowe ma większą wartość.

W praktycznych zastosowaniach filtr Butterwortha jest często wybierany jako kompromis pomiędzy właściwościami wynikającymi z tłumienia w paśmie zaporowym, a zniekształceniami sygnału [112,133,134].

## 9.2 Cyfrowe algorytmy filtracji sygnału

Jak udowodniono w publikacji „*The equivalence of digital and analog signal processing*” z roku 1965 [135] każdy filtr analogowy można zrealizować jako zespół filtrów cyfrowych, dzięki czemu każdy analogowy filtr możemy syntezyzować cyfrowo. Niestety nie każdy filtr cyfrowy można zrealizować analogowo.

Przykładami filtrów cyfrowych są algorytm Savitzky-Golay oraz filtracja FFT.

### 9.2.1 Algorytm Savitzky-Golay

Filtr Savitzky-Golay (SG) to filtr cyfrowy (algorytm), który pozwala na wygładzanie zestawu danych czyli zwiększenia stosunku sygnału / szumu. Filtrowanie danych algorytmem SG uzyskuje się w procesie splotu dopasowując kolejne podzbiory sąsiednich punktów danych do wielomianu określonego stopnia metodą najmniejszych kwadratów [136].

W praktycznych implementacjach do określenia parametrów filtru potrzebne jest określenie szerokości okna oraz stopnia wielomianu, którego funkcja jest dopasowywana w procesie splotu. Algorytm SG został opracowany przez Abrahama Savitzky’ego i Marcela J. E. Golaya w 1964 roku [137]. Obecnie jest stosowany prawie we wszystkich dziedzinach techniki, gdzie występuje znaczący udział szumu w sygnale [138–140]. Algorytm SG nie jest pozbawiony wad, na co dowodem mogą być najnowsze publikacje poruszające ten temat [141].

### 9.2.2 Filtr FFT

Filtracja FFT jest cyfrowym algorytmem filtracji, który pozwala na:

- przeniesienie sygnału w domenę częstotliwości
- określenie częstotliwości odcięcia o idealnej prostopadłej charakterystyce
- powrót sygnału do dziedziny czasu, bez udziału wybranych częstotliwości.

Do realizacji tego procesu wykorzystuje się implementację szybkiej trans-formaty Fouriera (FFT *Fast Fourier Transform*,) stąd skrócona nazwa filtracja FFT.

## 10. Przetworniki A/C w detekcji sygnałów optycznych

Przetworniki analogowo-cyfrowe pozwalają na pomiar wartości skutecznych napięcia z zachowaniem odpowiedniej precyzji. W zależności od architektury danego przetwornika mogą służyć do pomiarów sygnałów szybkozmiennych lub wolnozmiennych. Rozdzielczość, zawartość szumów w sygnale oraz dynamika przetwornika ma wpływ na wynik otrzymanego pomiaru.

W zależności od zastosowanego algorytmu detekcji oraz parametrów mierzonego sygnału potrzebne są różne metody pomiaru. Zaczynając od detekcji sygnału o danym poziomie i zliczaniu pojedynczych impulsów, a kończąc na pomiarze amplitudy każdego z impulsów.

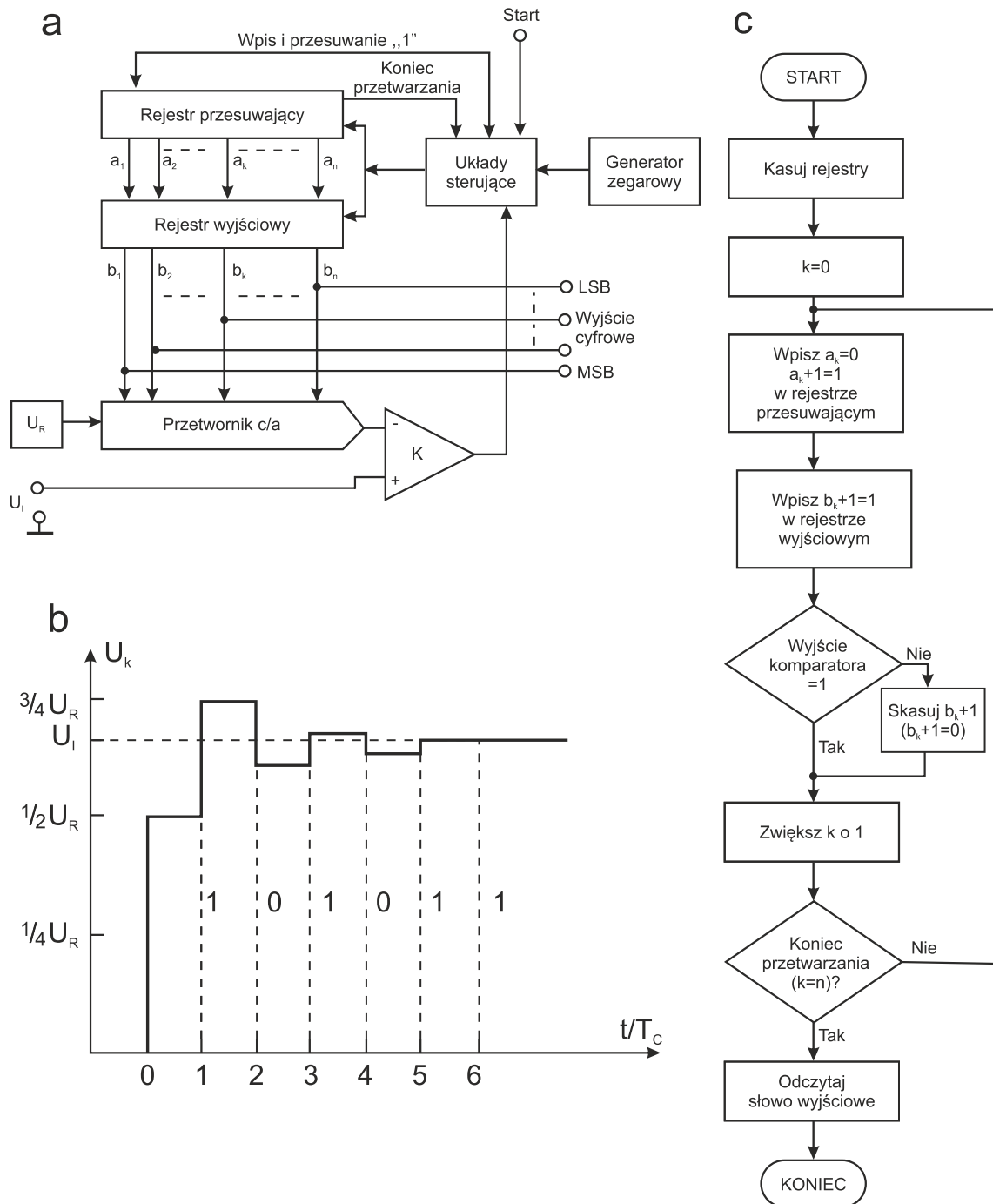
W przypadku pomiarów optycznych zazwyczaj otrzymywane impulsy są krótkie w czasie. Wymagają rozwiązań, które będą pozwalały na szybki pomiar zadanej wartości. Obecnie na rynku dominują przetworniki z sukcesywną aproksymacją, oraz przetworniki delta-sigma. Jednymi z najszybszych przetworników do pomiaru napięcia są przetworniki fast zwane również flash.

### 10.1 Przetwornik A/C z sukcesywną aproksymacją (SAR)

Przetwornik z sukcesywną aproksymacją (*successive approximation method*) jest odmianą przetwornika wykorzystującego do pomiaru metodę kompensacyjną.

Charakterystyczną cechą kompensacyjnych przetworników A/C jest obecność w pętli sprzężenia zwrotnego przetwornika cyfrowo-analogowego wytwarzającego napięcie kompensacyjne.

Istnieją dwie metody kompensacji. Pierwsza to kompensacja wagowa, gdzie poszczególne przyrosty napięcia referencyjnego odpowiadają wagą poszczególnych bitów kodu dwójkowego. Druga to metoda kompensacji równomiernej, gdzie zwiększanie wartości napięcia referencyjnego jest równomierne zwiększana o wartość najmniej znaczącego bitu [142].



Rys. 10-1 Przetwarzanie A/C metodą kompensacji wagowej a – schemat blokowy, b – przebieg napięcia kompensującego na wyjściu przetwornika A/C w przypadku słowa wyjściowego 101011,  $T_c$  – okres generatora zegarowego, c – algorytm procesu przetwarzania [142]

Bardzo często w literaturze zasadę działania przetwornika SAR porównuje się do wagi analitycznej, gdzie na jedną szalkę kładziemy odważnik o nieznannej masie (mierzone napięcie), a na drugiej szalce kładziemy odważniki, aby zrównoważyć na wagę dodając i odejmując odważniki o znanej wadze (zmiany napięcia kompensacyjnego).

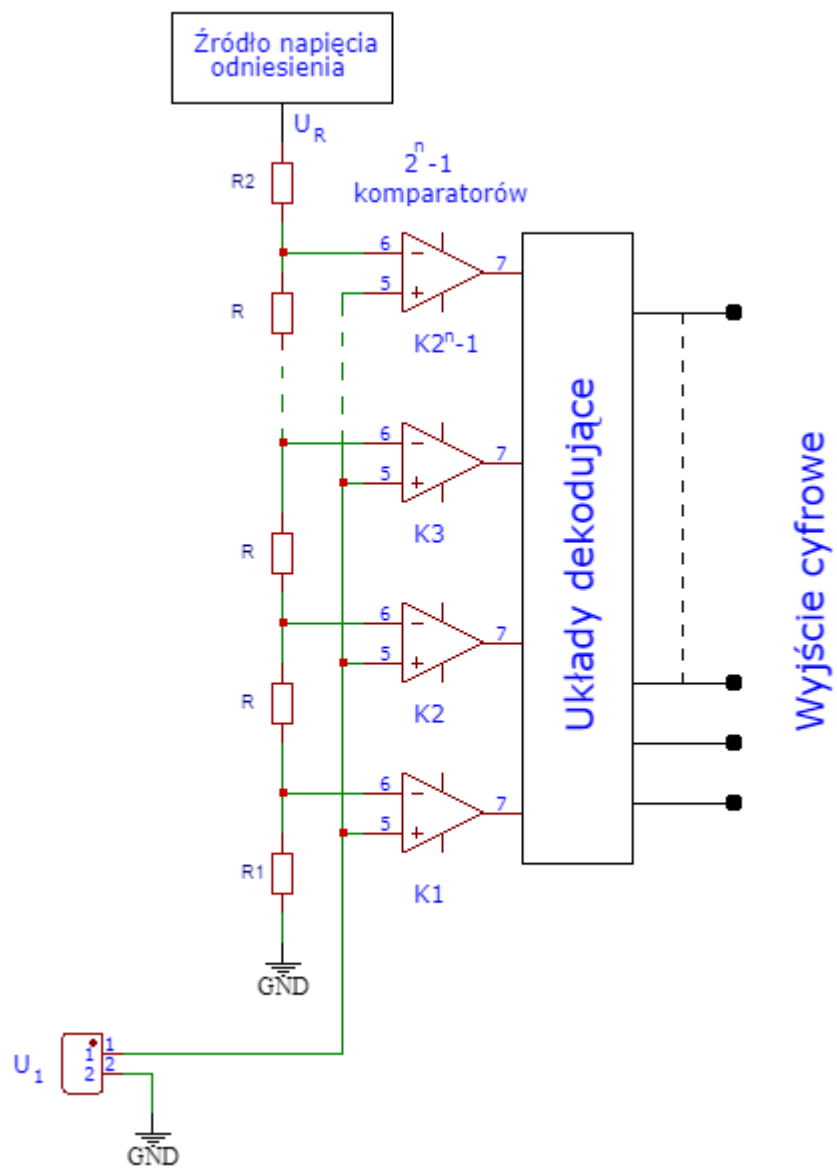
Po ustaleniu się stanu równowagi na wadze (na podstawie masy znanych odważników) ustalamy masę odważnika o nieznannej wadze.

Zaletą kompensacji wagowej jest krótki czas przetwarzania przetwornika. Przetwornik  $n$ -bitowy wymaga  $n$  kroków przetwarzania. Więc czas ten jest równy  $nT_c$  (gdzie  $T_c$  to czas trwania jednego kroku – czas konwersji) i jest niezależny od wartości napięcia przetwarzanego Rys. 10-1.

Wadą przetworników SAR jest nieliniowość przetwornika (którą można kompensować) oraz mniejsza szybkość przetwarzania w porównaniu z przetwornikiem typu flash. Przetworniki SAR obecnie są stosowane jako zintegrowane peryferia w strukturach układów mikroprocesorowych. Układy mikroprocesorowe firmy STMicroelectronics w swoich strukturach posiadają 12 bitowe przetworniki SAR.

## 10.2 Przetwornik typu flash

Przetwornik typu flash – wykorzystujący metodę bezpośredniego porównania równoległego jest najszybszym ze znanych sposobów przetwarzania analogowo-cyfrowego (A/C). Podczas wykonywania pomiaru następuje jednocześnie porównanie napięcia  $U_1$  (Rys. 10-2) ze wszystkimi poziomami kwantowania. Realizuje to zestaw komparatorów spolaryzowanych z dzielnika rezystorowego oraz źródła napięcia odniesienia. Rezystory dzielnika są tak dobrane aby napięcia progów sąsiednich komparatorów różniły się o wartość najmniej znaczącego bitu (1LSB). Układ składa się z tylu komparatorów, ile posiada poziomów kwantowania przetwornik, czyli  $2^n - 1$  komparatorów w przypadku przetwornika  $n$ -bitowego. Ponieważ wszystkie komparatory jednocześnie zmieniają swój stan, proces przetwarzania składa się tylko z jednego kroku. Na wyjściu układu uzyskuje się informację w postaci kodu BCD lub Gray'a. Układy flash są wytwarzane zazwyczaj o rozdzielczości 6 lub 8 bitów i częstotliwości próbkowania od 20 do 100 MHz [142].

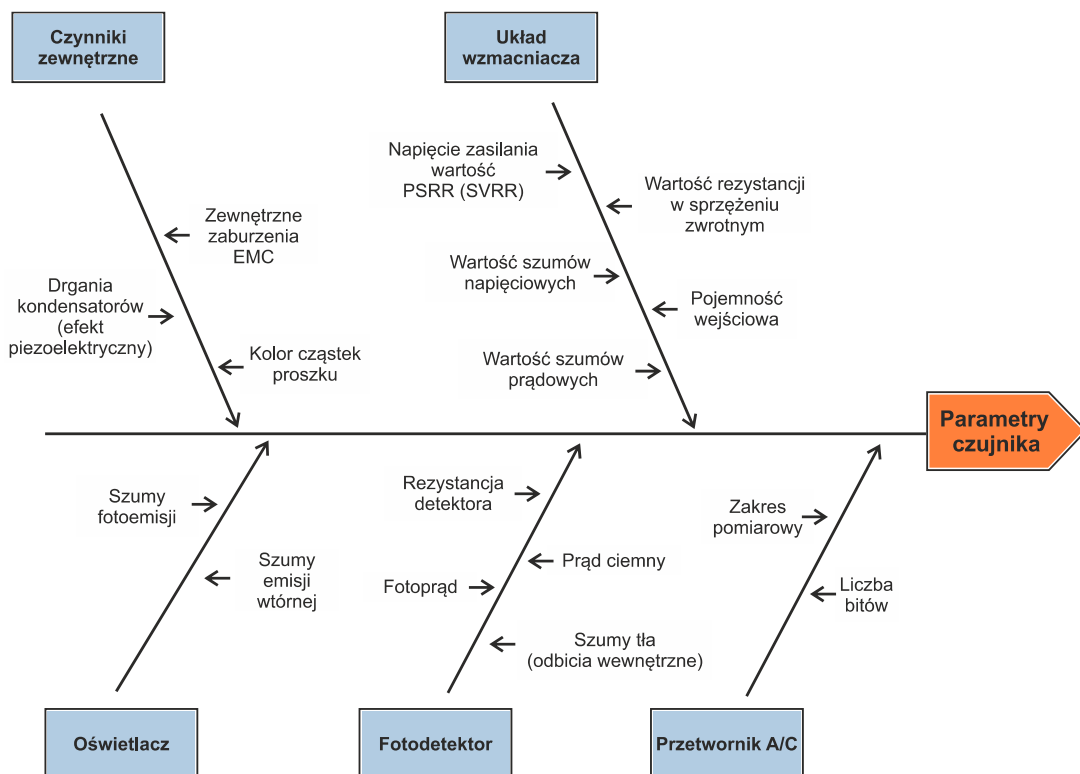


Rys. 10-2 Schemat przetwornika A/C z bezpośrednim porównaniem równoległym [142]



# 11. Wpływ poszczególnych czynników na parametry sensora

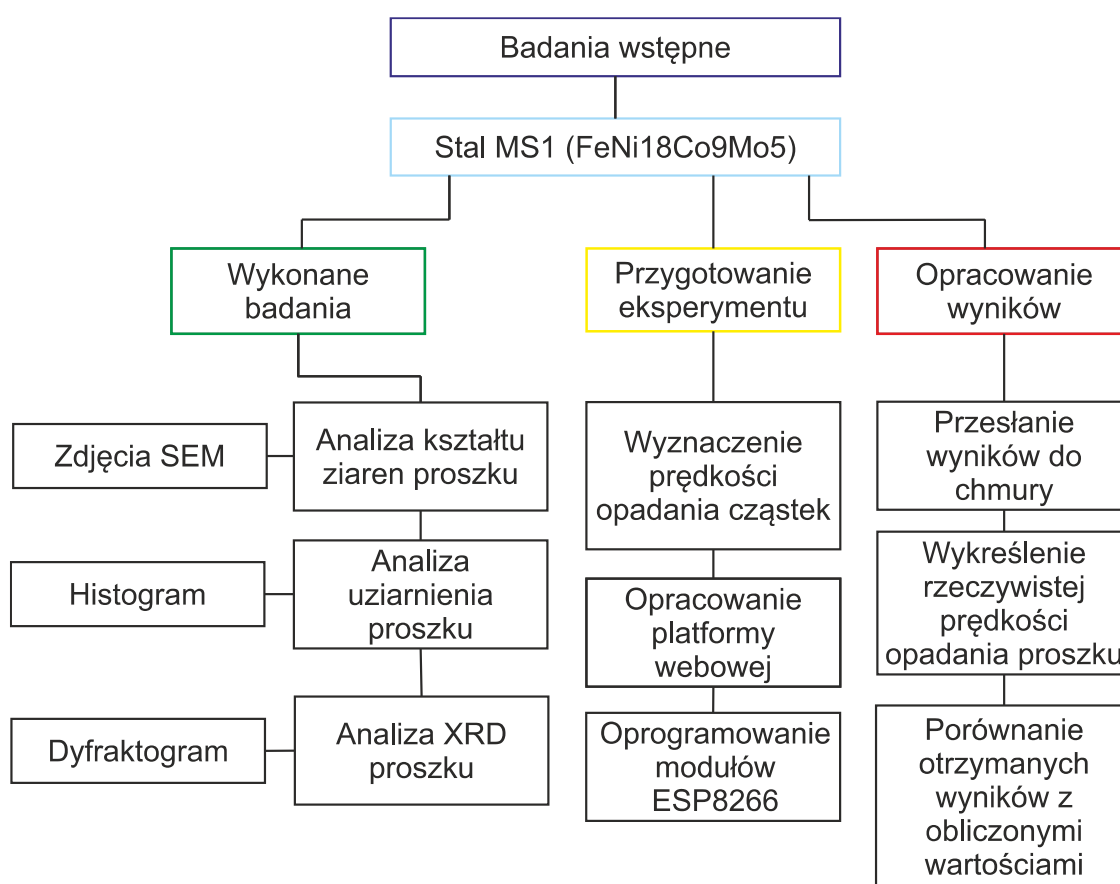
Mając na uwadze wszystkie wyżej wymienione zagadnienia można przedstawić graficznie wpływ poszczególnych czynników na parametry czujnika zapylenia Rys. 11-1.



Rys. 11-1 Wpływ poszczególnych czynników na parametry czujnika zapylenia

## 12. Badania własne

W pierwszym etapie przeprowadzono badania wstępne mające na celu ustalenie kształtu ziaren proszku, wielkości cząstek, zawartości tlenków oraz prędkości opadania cząstek w powietrzu. Plan wstępnych badań przedstawia Rys. 12-1.

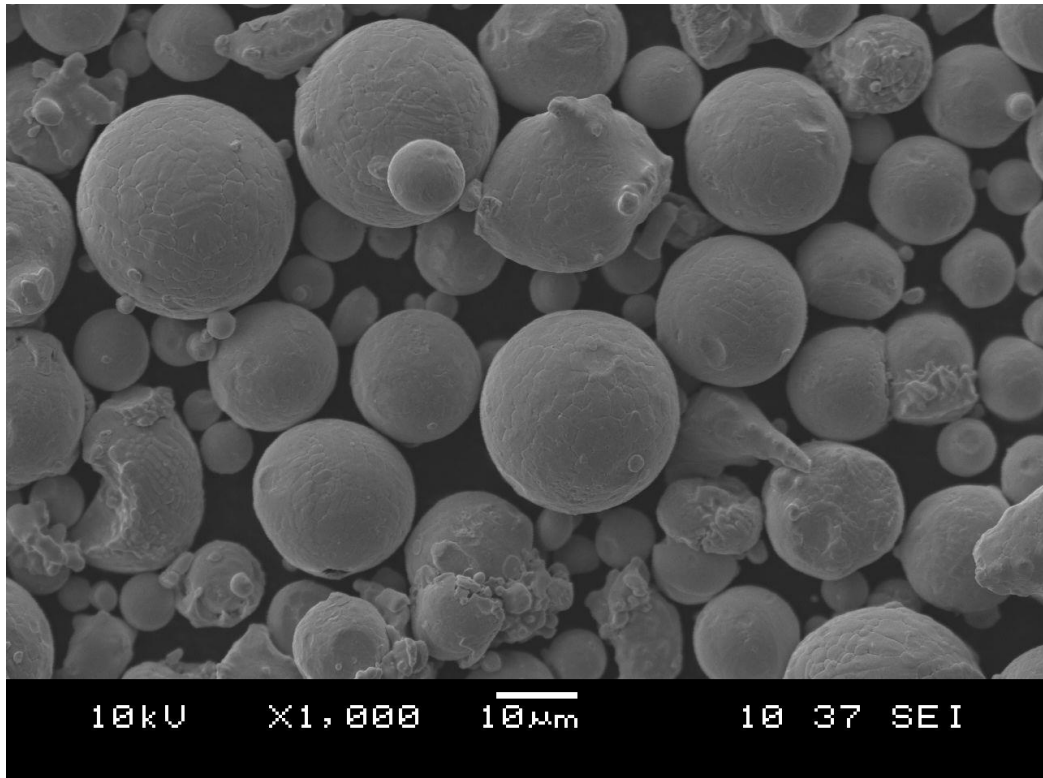


Rys. 12-1 Plan wstępnych badań

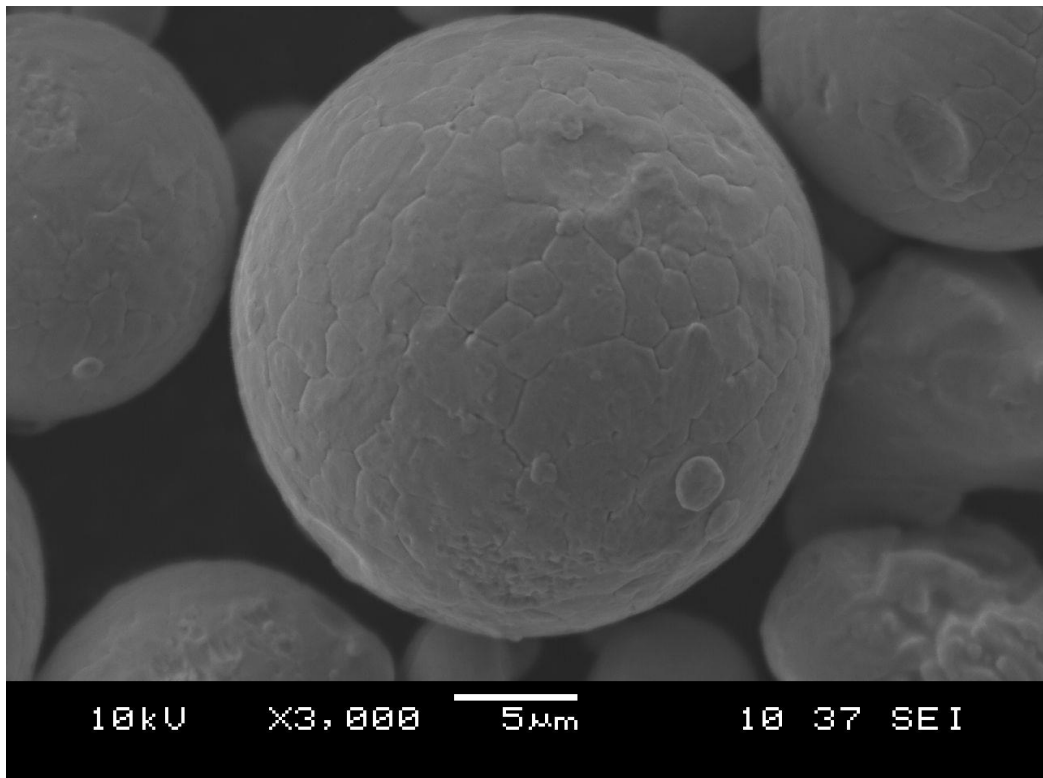
### 12.1 Badania wstępne

Zdjęcia wykonane w celu określenia kształtu ziaren proszku stali MS1 [143] przedstawia Rys. 12-2 oraz Rys. 12-3. Do analizy sitowej pobrano 100 g proszku MS1. Analizę sitową przeprowadzono w celu określenia rozkładu wielkości ziaren proszku dla stali MS1 (Rys. 12-4). Analiza XRD (*X-ray diffraction*) została przeprowadzona na urządzeniu Empyrean PANalytical z zastosowaniem lampy miedzianej ( $\text{CuK}\alpha$  30kV 40mA)

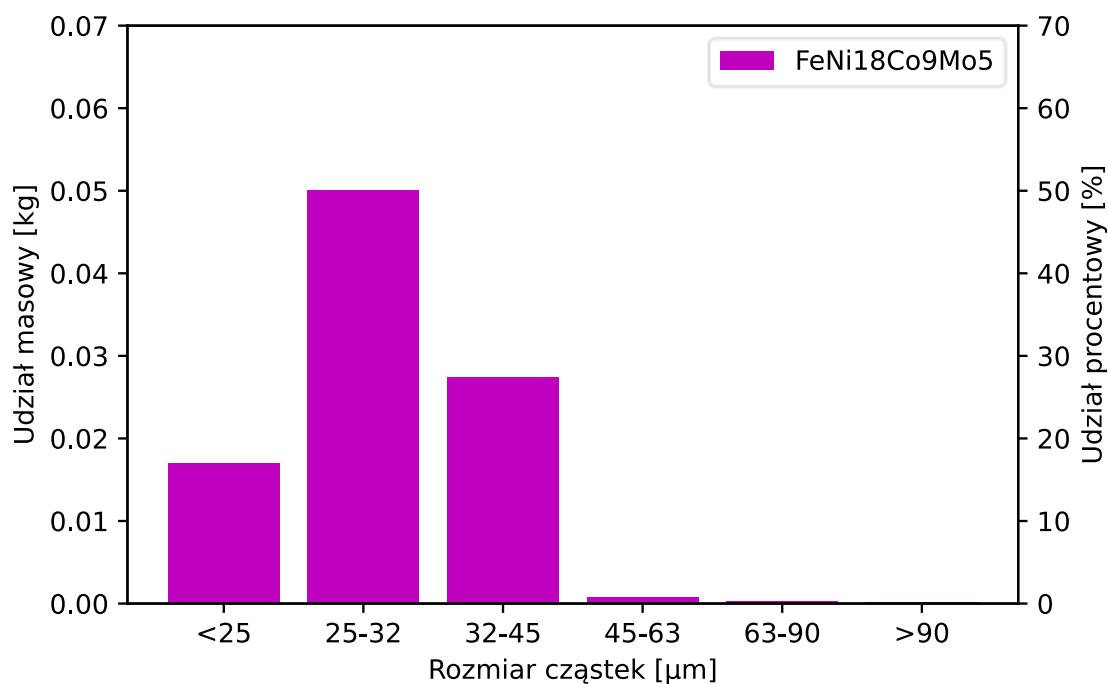
przeprowadzone badania miały na celu określenie zawartości tlenków w proszku stali MS1 (dyfraktogram przedstawia Rys. 12-5).



Rys. 12-2 Zdjęcie cząstek proszku MS1 pow. 1000x w trybie SEI

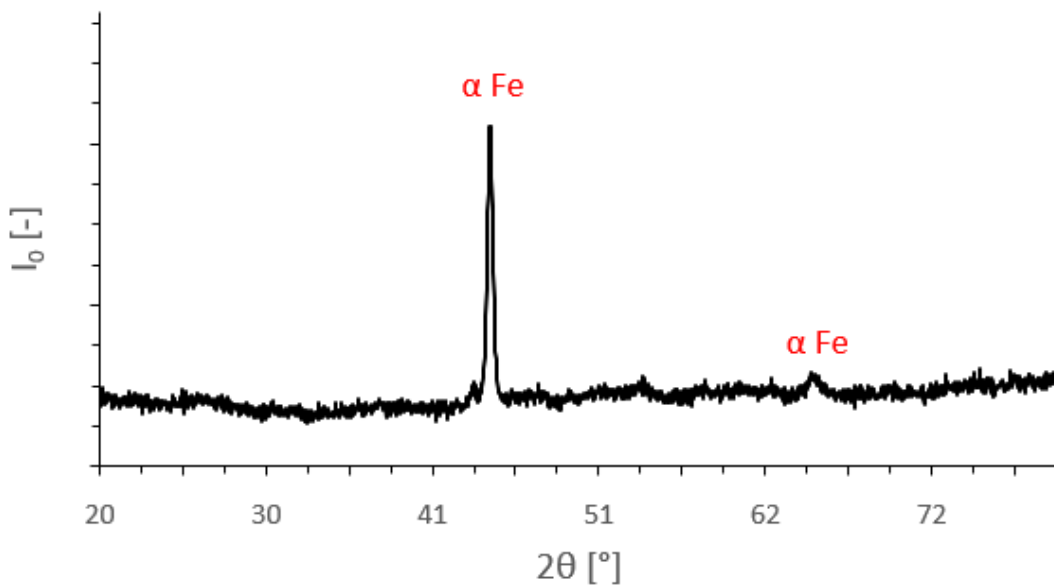


Rys. 12-3 Zdjęcie cząstek proszku MS1 pow. 3000x w trybie SEI



Rys. 12-4 Analiza sitowa 100 g proszku MS1

### FeNi18Co9Mo5



Rys. 12-5 Wynik analizy XRD dla proszku stali MS1

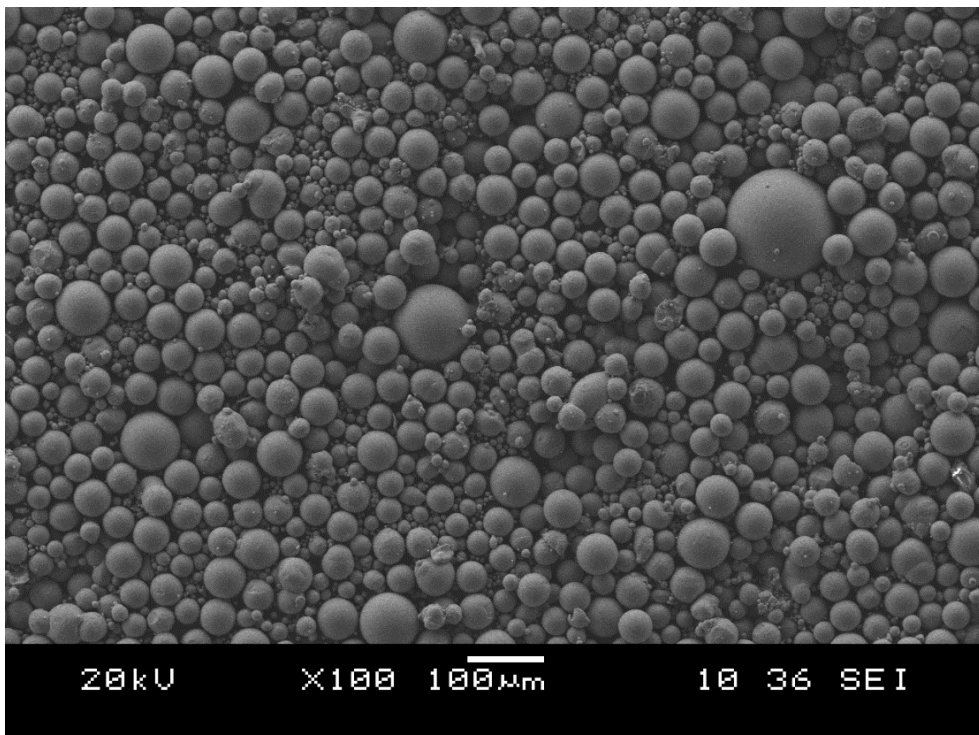
Po analizie procesu SLS/SLM postanowiono zbadać zawartość filtru powietrza (Kamoka Ref. No. F207001) znajdującego się w urządzeniu AM250 do procesu SLM.

**AR 327/2**

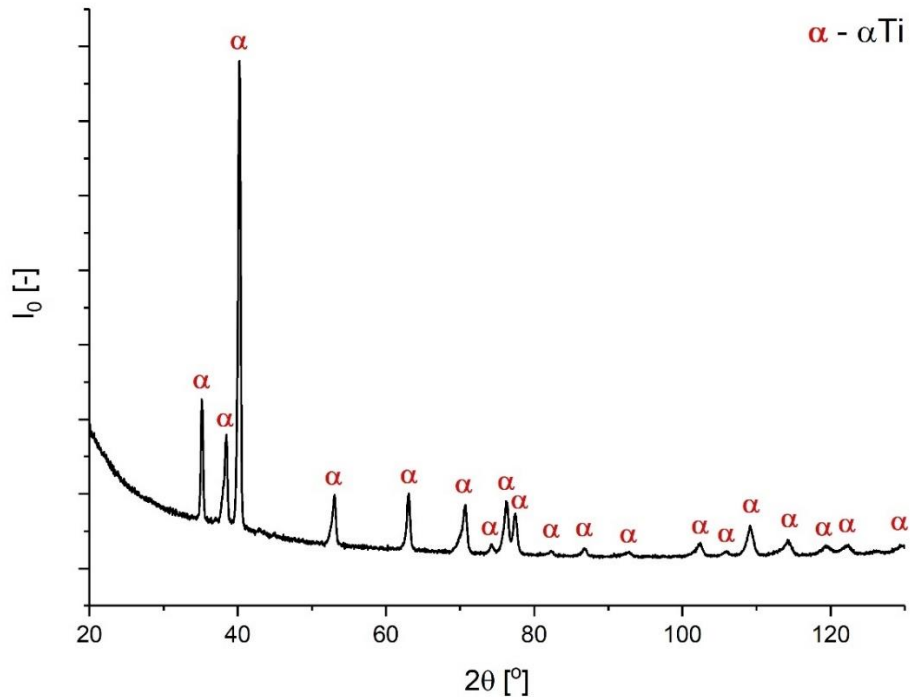


Rys. 12-6 Filtr powietrza znajdujący się w urządzeniu do procesu SLS [144]

W celu określenia kształtu oraz rozmiarów cząstek wykonano zdjęcie mikroskopem skaningowym Rys. 12-7. Aby określić zawartość tlenków wykonano analizę XRD Rys. 12-8. Rys. 12-6 przedstawia zawartość filtru powietrza znajdującego się wewnątrz urządzenia do procesu SLS (AM250).



Rys. 12-7 Cząstki proszku Ti-6AL-4V znajdujące się w filtrze powietrza po procesie SLS pow. 100x w trybie SEI



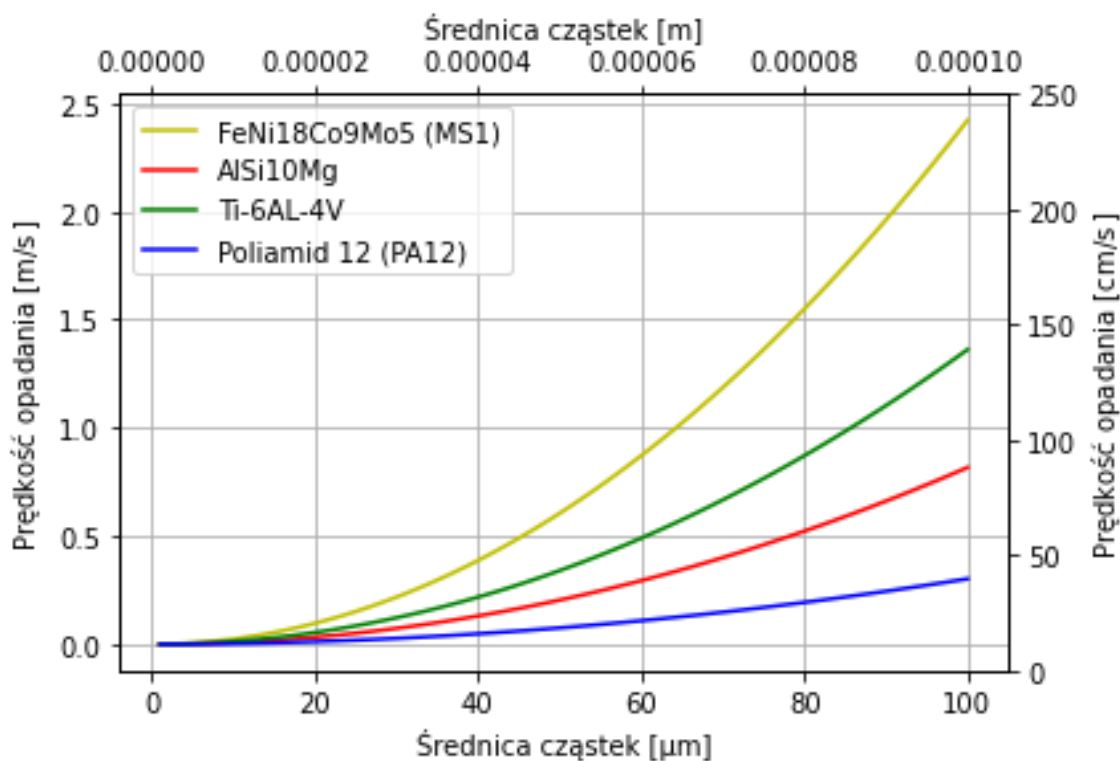
Rys. 12-8 Dyfraktogram proszku Ti-6AL-4V znajdującego się w filtrze powietrza z urządzenia Renishaw AM250 po procesie SLS

Na podstawie analizy XRD oraz zdjęć z mikroskopu (SEM) nie stwierdzono obecności tlenków na powierzchni badanego materiału przed procesem oraz po procesie SLS/SLM.

Na podstawie równania Naviera-Stokesa wyznaczono teoretyczną prędkość opadania proszków (w powietrzu) najczęściej stosowanych w procesie SLS/SLM, co przedstawia Rys. 12-9 oraz Tab. 12-1 oraz Tab. 12-2. Równanie, na podstawie którego wyznaczono prędkości opadania cząstek przedstawiono poniżej.

$$v_{st} = \frac{(\rho_s - \rho_c) * g * D^2}{18 * \eta} \quad (12-1)$$

Gdzie:  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $\rho_s$  - gęstość materiału,  $\rho_c$  - gęstość cieczy,  $\eta$  - dynamiczna lepkość newtonowska (powietrza) [31].



Rys. 12-9 Prędkość opadania wybranych cząstek proszków stosowanych w procesie wytwarzania przyrostowego na podstawie równania Naviera-Stokesa

Tab. 12-1 Prędkość opadania kulistych cząstek proszku o średnicy 25  $\mu\text{m}$  w powietrzu

Materiał	Średnica cząstki [ $\mu\text{m}$ ]	Prędkość opadania [m/s]
Poliamid 12 (PA12)	25	0,018
AlSi10Mg	25	0,051
Ti-6AL-4V	25	0,051
FeNi18Co9Mo5 (MS1)	25	0,151

Tab. 12-2 Prędkość opadania kulistych cząstek proszku o średnicy 45  $\mu\text{m}$  w powietrzu

Materiał	Średnica cząstki [ $\mu\text{m}$ ]	Prędkość opadania [m/s]
Poliamid 12 (PA12)	45	0,061
AlSi10Mg	45	0,165
Ti-6AL-4V	45	0,275
FeNi18Co9Mo5 (MS1)	45	0,490

## 12.2 Stanowisko testowe

Komorę pomiarową o objętości 1 m<sup>3</sup> wykonano ze szkła (Rys. 12-10). Stanowisko wyposażono w filtr HEPA klasy 13, który zapobiegał wydostawaniu się proszku z komory i wytwarzaniu nadciśnienia. Przewody pomiarowe prowadzono przez dławiki kablowe o stopniu ochrony IP65.

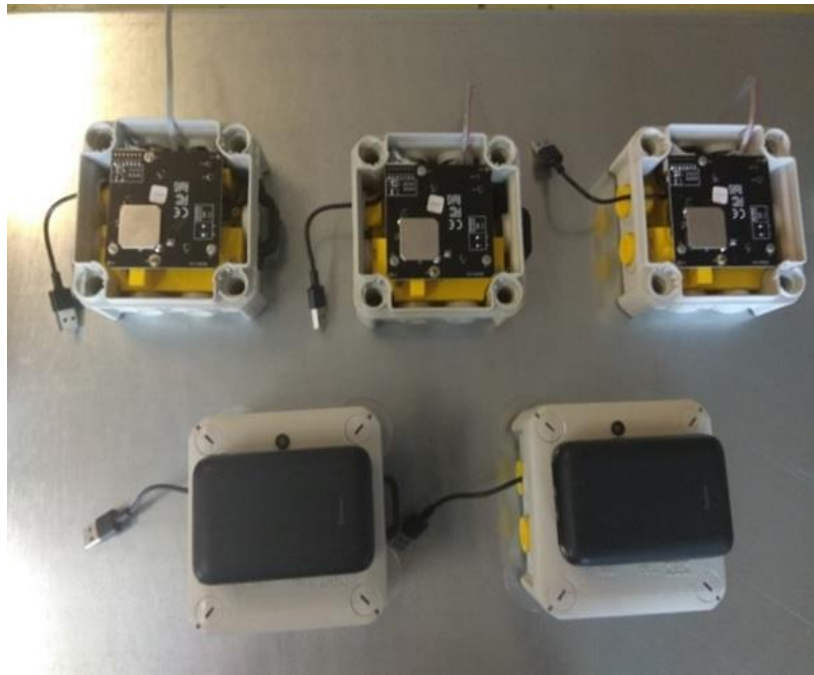


Rys. 12-10 Stanowisko pomiarowe do testowania sensorów

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano cztery detektory SDS198 (S1-S4) pracujące w trybie ciągłym, wyselekcjonowane na podstawie specyfikacji technicznej oraz dostępności [62]. Moduły pomiarowe znajdowały się wewnątrz komory na wysokościach 20, 40, 60 i 80 cm nad dnem komory. Do zamocowania czujników w przestrzeni wykorzystano drabinkę wykonaną ze stali nierdzewnej. Do akwizycji pomiarów zaadoptowano platformę webową opartą na oprogramowaniu Grafana [145] umożliwiającą wizualizację zebranych pomiarów z urządzeń opartych na modułach laserowych SDS198 [62] oraz moduły NodeMCU v3 [70] z mikrokontrolerem ESP8266 [146] (Rys. 12-11) przesyłających dane bezpośrednio do chmury. Oprogramowanie Grafana miało możliwość wizualizacji wszystkich zebranych danych oraz wykonywania operacji, takich jak wykreślanie



średniego stężenia w danym okresie czasu oraz określenie odchyłek pomiarowych między czujnikami.



*Rys. 12-11 Czujniki SDS198 wraz z układami ESP8266 do przeprowadzania zautomatyzowanych pomiarów*

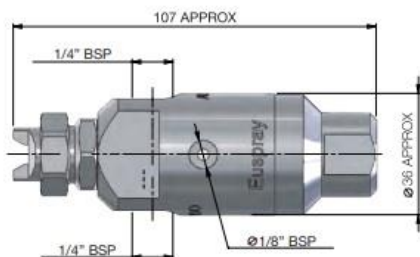
### **12.3 Zestawienie uzyskanych wyników**

Podczas eksperymentu wstrzyknięto 20 g proszku (o znanym rozkładzie uziarnienia) do komory testowej. Proszek był podawany za pomocą systemu dozowania proszku, który został specjalnie opracowany do potrzeb eksperymentu. System dozowania proszku został poddany ochronie patentowej (P.439724) [147]. Zastosowaną głowicę dozującą przedstawiono na Rys. 12-12.

### Caratteristiche dimensionali

Le dimensioni degli atomizzatori pneumatici generalmente sono:

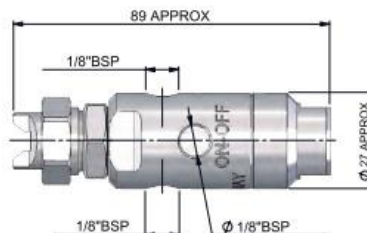
#### PA1



### Dimensional characteristics

The dimensions of the air atomizing nozzles are generally:

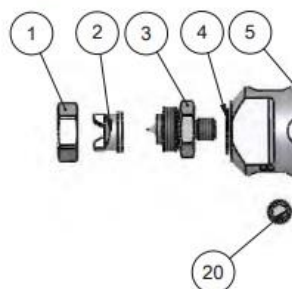
#### PA3



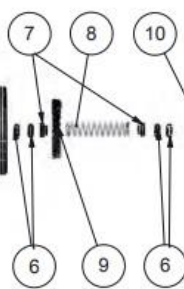
### Características dimensionales

Las dimensiones de los pulverizadores neumáticos son generalmente:

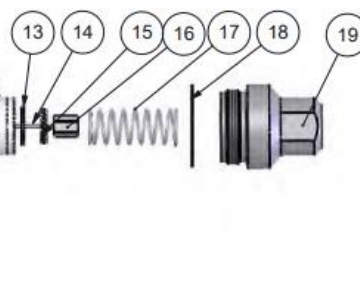
### Componenti



### Components



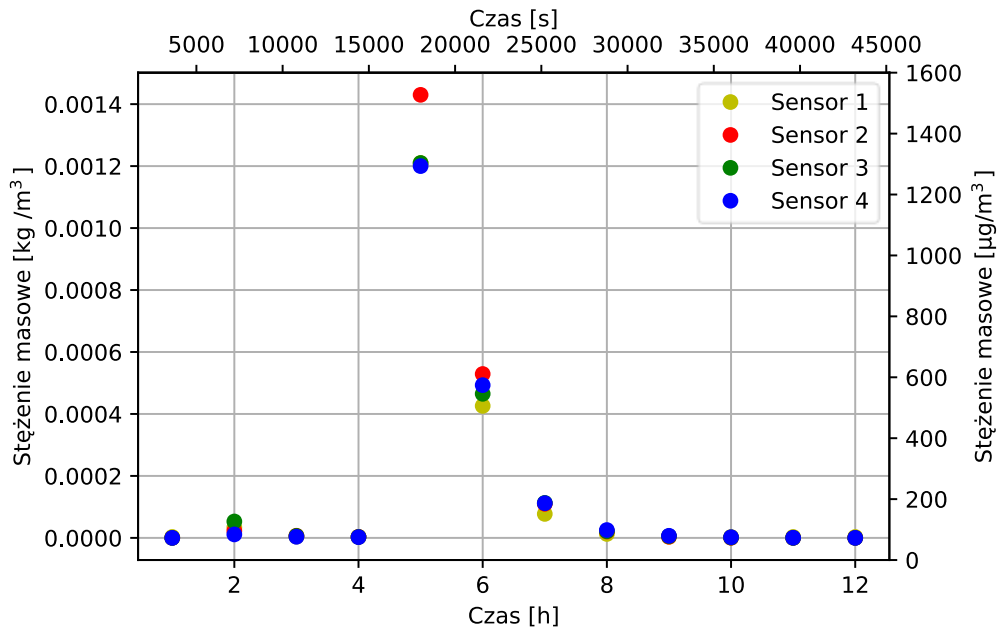
### Componentes



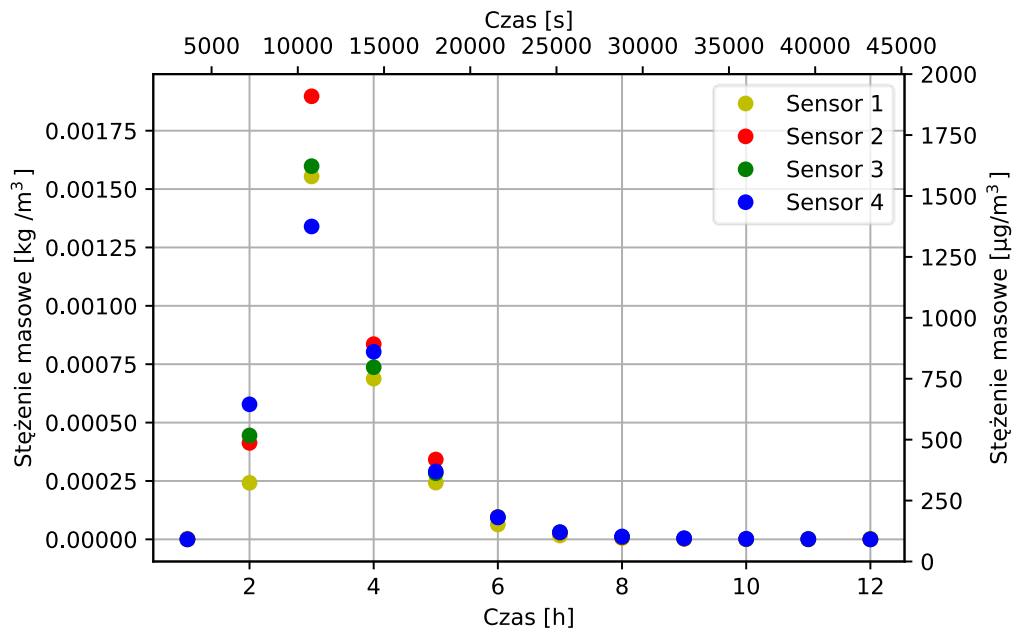
① Ghiera Retainer ring Tuerca	② Ugello dell'aria Air nozzle Boquilla del aire	③ Ugello del liquido Liquid nozzle Boquilla del liquido	④ Tenuta in teflon Teflon tape Junta en teflón	⑤ Corpo pistola Gun body Cuerpo pistola
⑥ Guarnizione ago in teflon Teflon Seal needle Juntas de la aguja en teflón	⑦ Rondella Flat washer Arandela	⑧ Molla Spring Muelle	⑨ Rondella Locking washer Arandela elástica	⑩ Vite di regolazione Sliding adjustment screw Tornillo de regulación
⑪ Supporto guarnizione a tappa Cup seal support Soporte de apoyo de la junta de la tapa	⑫ Guarnizione a tazza Cup seal Sello de la tapa	⑬ Rondella piatta (flat) washer Arandela plana	⑭ Ago Needle Aguja	⑮ Rondella Locking washer Arandela
⑯ Dado di fissaggio Fastening Rope nut Tuerca de fijación	⑰ Molla di chiusura Closing spring Muelle de cierre	⑱ Guarnizione Seal Juntas	⑲ Coperchio pistola Gun cap Tapa posterior de la pistola	⑳ Grano 1/8" 1/8" grain Tornillo 1/8

Rys. 12-12 Wyspecjalizowana głowica atomizująca z PA1/ PA2 firmy Euspary z mechanizmem samoczyszczącym zastosowana w stanowisku pomiarowym [148].

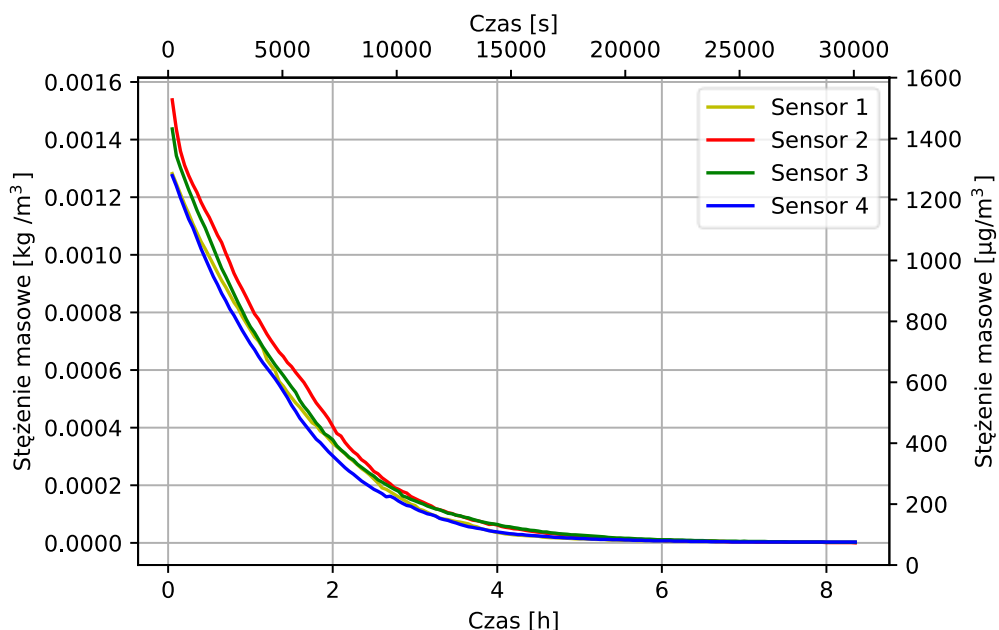
Pomiary wykonywano z wymuszonym przepływem powietrza (Rys. 12-13) oraz bez wymuszonego przepływu powietrza (Rys. 12-14). Po otrzymaniu danych sporządzono wykresy gdzie każdy punkt reprezentował średnią arytmetyczną z pomiarów wykonanych w ciągu 1 h oraz wizualizacje dla wszystkich zebranych próbek (jedna próbka co trzy minuty Rys. 12-15) w ciągu trwania całego eksperymentu.



Rys. 12-13 Prędkość opadania proszku stali MS1 z wymuszonym przepływem powietrza



Rys. 12-14 Prędkość opadania proszku stali MS1 bez wymuszonego przepływu powietrza



Rys. 12-15 Prędkość opadania proszku stali MS1 z wymuszonym przepływem powietrza  
– wszystkie próbki

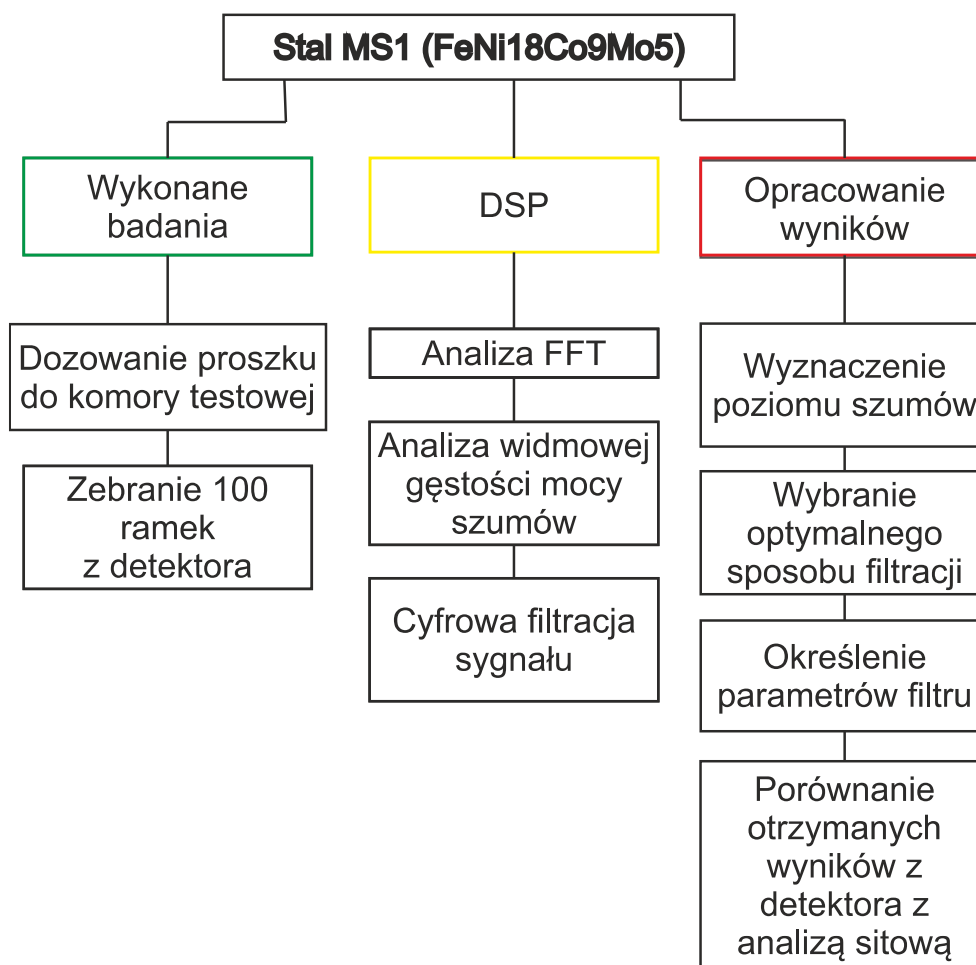
## 12.4 Podsumowanie badań wstępnych

Moduły SDS198 nie są przystosowane do pomiaru cząstek o dużych gęstościach, ponieważ prędkość zasysania powietrza jest niewystarczająca. Na podstawie wstępnych badań wykazano, iż należy opracować dedykowane rozwiązanie do pomiaru zapylenia przy procesach SLS/SLM, ponieważ zastosowany wentylator w modułach SDS198 nie posiada odpowiedniej prędkości zasysania dla proszków o dużej gęstości stosowanych w aplikacjach związanych z technologiami łoża proszkowego.

### 13. Opracowanie własnego rozwiązania

Po analizie wstępnych badań ustalono plan eksperymentu (

Rys. 13-1) dla rozwiązania wykorzystującego wzmacniacz bez przetwarzania oraz wzmacniacz z przetwarzaniem.



Rys. 13-1 Plan eksperymentu

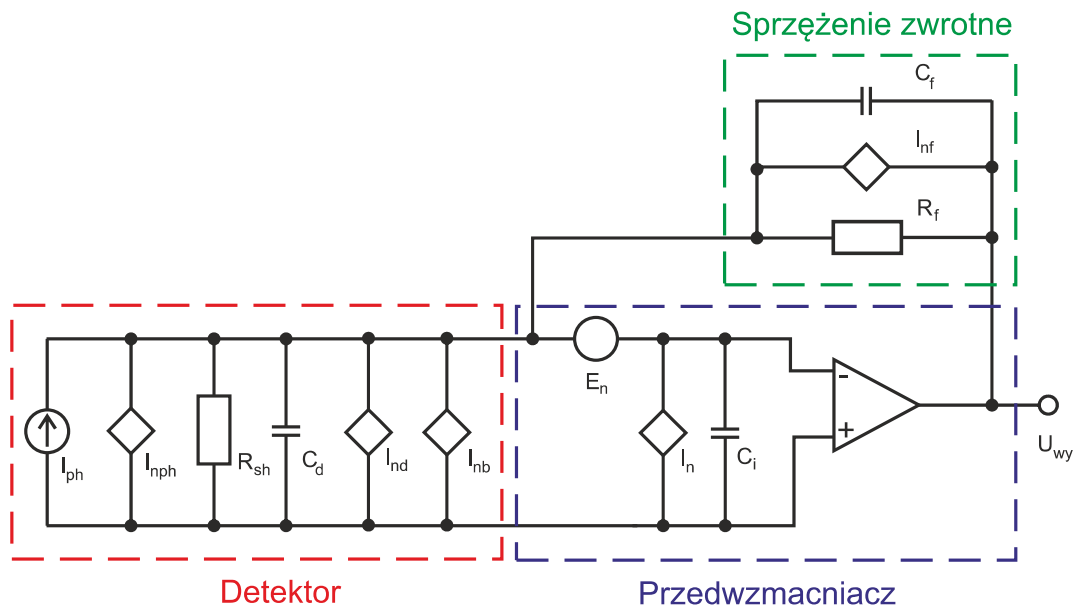
## 14. Model szumowy układu pomiarowego

Układ pomiarowy składa się z dwóch sekcji: przedwzmacniacza w konfiguracji wzmacniacza transimpedancyjnego (*transimpedance amplifier*, TIA) oraz dwóch kolejnych wzmacniaczy w konfiguracji wzmacniacza nieodwracającego dlatego przeprowadzono analizę szumową obydwu układów pojedynczo w celu określania poziomu szumu wyjściowego oraz kluczowych parametrów w układzie detektora.

### 14.1 Układ wzmacniacza transimpedancyjnego (TIA)

Podczas analizy szumowej układu wzmacniacza w układzie TIA trzeba wyróżnić kilka składowych tworzących całkowity szum w układzie Rys. 14-1. Aby w pełni przeanalizować szумы w układzie należy wziąć pod uwagę:

- Charakter szumów (szумы termiczne oraz śrutowe)
- Szумы prądowe wzmacniacza  $I_n$
- Szумы napięciowe wzmacniacza operacyjnego  $E_n$
- Rezystancję równoległą fotodiody  $R_{sh}$
- Rezystancje w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza  $R_f$
- Wartości fotoprądu  $I_{ph}$
- Prąd ciemny detektora  $I_d$



Rys. 14-1 Schemat zastępczy wzmacniacza z detektorem ( $I_n$  – źródło szumów prądowych,  $E_n$  – źródło szumów napięciowych)

Wartość napięcia na wejściu układu jest proporcjonalna do wartości fotoprądu  $I_{ph}$  oraz impedancji detektora  $Z_d$ . Wartość napięcia wyjściowego z układu  $V_o$  jest równa iloczynowi fotoprądu  $I_{ph}$  oraz impedancji sprzężenia zwrotnego  $Z_f$  co przedstawia również równanie ( 14-1).

$$V_o = -I_{ph}Z_f \quad (14-1)$$

## 14.2 Szumy termiczne w układzie TIA

Rozpatrując współpracę fotodiody oraz wzmacniacza operacyjnego należy przyjrzeć się szumom termicznym generowanym przez rezystancje w sprzężeniu zwrotnym  $R_f$ .

Zakładając iż szumy termiczne rezystora  $R_f$  możemy przedstawić równaniem ( 14-2) jako źródło prądowe

$$i_{nf} = \sqrt{\frac{4kTB}{R_f}} \quad (14-2)$$

gdzie:  $i_{nf}$  – wartość szumu termicznego rezystora  $R_f$ ,  $T$  – temperatura,  $k$  – stała Boltzmanna,  $R_f$  – rezystancja rezystora,  $B$  – szerokość pasma układu

Oraz szumy termiczne detektora w postaci równania ( 14-3)

$$i_{nph} = \sqrt{2qI_{ph}} \quad ( 14-3)$$

Gdzie:  $i_{nph}$  – wartość szumu termicznego detektora,  $q$  – elementarny ładunek elektronu

Można sformułować warunek ( 14-4), iż szumy termiczne rezystora  $R_f$  powinny być większe od szumów termicznych detektora

$$R_f > \frac{2kR_f}{qI_{ph}} \quad ( 14-4)$$

Co powoduje iż wartość rezystancji  $R_f$  powinna być znacznie większa od rezystancji detektora  $R_{sh}$ .

Warto zaznaczyć iż wartość  $R_{sh}$  jest podawana w katalogach jako wartość rezystancji równoległej fotodiody przy polaryzacji 0V niestety nie we wszystkich karatach katalogowych można odczytać dlatego pominięto źródło szumu rezystancji  $R_{sh}$  w obliczeniach.

### 14.3 Szumy śrutowe w układzie TIA

Drugim typem szumów występujących w układzie jest szum śrutowy wynikający z prądu przepływającego przez fotodiodę.

W przypadku kiedy na detektor nie pada promieniowanie i mamy do czynienia jedynie z prądem ciemnym fotodiody  $I_d$ , źródło szumów możemy przedstawić przy pomocy równania ( 14-5).

$$i_{nd} = \sqrt{2qI_d} \quad ( 14-5)$$

Gdzie:  $q$  – elementarny ładunek elektronu,  $I_d$  - prąd ciemny fotodiody



W przypadku rozważania układu, który nie jest izolowany uwzględniania się również wpływ szumów tła  $i_{nb}$ . Wzór określający wartość szumu jest tożsamy ze wzorem (14-5) jedyną różnicą jest zmiana wartości prądu  $I_d$  na wartość prądu tła  $I_b$ .

#### 14.4 Szumy napięciowe wzmacniacza operacyjnego

Technologia wykonania stopni wejściowych wzmacniacza ma kluczową rolę. We wzmacniaczach wykorzystujących w stopniach wejściowych tranzystory bipolarne szumy napięciowe mają mniejsze wartości niż w przypadku stopni wejściowych wykonanych z zastosowaniem tranzystorów typu FET.

Niestety przy zastosowaniu wzmacniaczy wykorzystujących w stopniu wejściowym tranzystory bipolarne prądy upływu oraz polaryzacji wejść są większe niż w przypadku wzmacniaczy FET, co utrudnia ich zastosowanie w układach, gdzie występują niskie częstotliwości oraz niskie wartości napięcia wejściowego.

Szumy prądowe we wzmacniaczach zazwyczaj wynikają z prądów upływu zależnych od technologii wykonania i mają charakter szumu śrutowego.

Zazwyczaj charakterystyka szumowa wzmacniacza nie jest płaska w całym zakresie częstotliwości. W większości przypadków szum przy niskich częstotliwościach posiada cechy szumu różowego, a po przekroczeniu pewnej granicy (w zależności od danego typu wzmacniacza) przyjmuje stałą wartość.

#### 14.5 Określenie minimalnej wartości pojemności $C_f$

Warto zaznaczyć iż znając pojemność złączowa diody  $C_d$  oraz pojemności wejściowe  $C_i$  wzmacniacza wyznacza wraz z wartością pojemności  $C_f$  górną częstotliwość graniczną układu  $f_c$  co jest opisane równaniem (14-6).

Należy pamiętać iż pojemność wejściowa wzmacniacza  $C_i$  to suma pojemności wejściowej wzmacniacza w trybie różnicowym (*input differential capacitance*) oraz w trybie wspólnym (*input common-mode capacitance*).

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f (C_i + C_d + C_f)}$$

(14-6)

Mając na uwadze, iż niepoprawnie dobrane pojemności mogą prowadzić do wzmacniania szumów napięciowych oraz niestabilności wzmacniacza, należy znać minimalną pojemność zapewniającą stabilną pracę układu.

Znając współczynnik sprzężenia zwrotnego oraz charakterystykę wzmocnienia wzmacniacza w otwartej pętli [149] można wyznaczyć minimalną pojemność  $C_f$  co przedstawia równanie (14-7).

$$C_f = \frac{C_i}{2\pi R_f GBW}$$

(14-7)

Gdzie:  $C_i$  – pojemność wejściowa wzmacniacza wraz z pojemnością złącza fotodiody,  $R_f$  – wartość rezystora  $R_f$ ,  $GBW$  – iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma (wartość katalogowa)

## 14.6 Charakterystyce szumowa wzmacniacza TIA

W zależności od danego wzmacniacza charakterystyka szumowa może mieć różny kształt. Całkowite szумы danego wzmacniacza odniesione do wejścia można obliczyć jako całkę z spektralnej gęstości mocy w danym przedziale częstotliwości odpowiadającej szerokości pasma dennego układu.

Znając charakterystyczne odcinki na charakterystyce szumowej

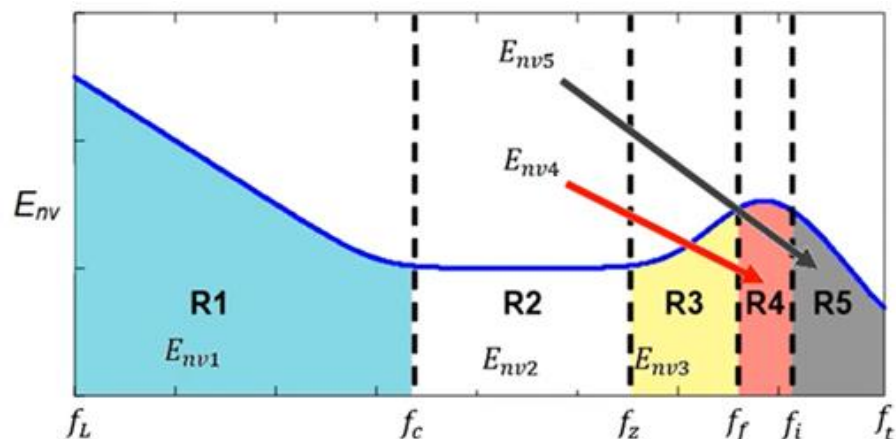
Rys. 14-2) oraz całkując dane przedziały możemy użyć uproszczonych wyrażeń do obliczania szumu napięciowego wzmacniacza w danym zakresie częstotliwości.

Wzory do obliczenia skutecznej wartości szumu napięciowego w danym przedziale charakterystyki zawiera Tab. 14-1.

Tab. 14-1 Wzory umożliwiające obliczenie skutecznej wartości szumu na wyjściu wzmacniacza - na podstawie [149]

Numer obszaru	Wzór
Obszar 1: R1	$E_{nv1} = e_n \sqrt{f_c \ln \left( \frac{f_c}{f_L} \right)}$
Obszar 2: R2	$E_{nv2} = e_n \sqrt{f_z - f_c}$

Obszar 3: R3	$E_{nv3} = e_n \sqrt{\frac{f_f^3 - f_z^3}{3f_z^2}}$
Obszar 4: R4	$E_{nv4} = e_n \left(1 + \frac{C_{in}}{C_f}\right) \sqrt{f_i - f_f}$
Obszar 5: R5	$E_{nv5} = e_n \sqrt{\frac{f_t^2}{f_i}}$



Rys. 14-2 Typowa charakterystyka szumowa wzmacniacza operacyjnego w skali logarytmicznej - na podstawie [149]

Mając na uwadze, iż znana jest częstotliwość graniczna układu  $f_c$  oraz obwód jest obwodem pierwszego rzędu można obliczyć częstotliwość przy której następuje wzrost wartości napięcia szumów w przedziale R4 (Rys. 14-2) co opisuje wzór (14-8).

$$NBW = f_c * \frac{\pi}{2} \quad (14-8)$$

Gdzie: NBW – częstotliwość wzmocnienia szumów napięciowych w przedziale R2 (closed-loop noise bandwidth),  $f_c$  –górna częstotliwość graniczną układu

W przypadku występowania wszystkich odcinków na charakterystyce szumowej wzmacniacza (

Rys. 14-2) wartość skuteczna (RMS) napięcia szumów  $E_n$  odniesiona do wejścia przedstawia równanie (14-9).

$$E_n = \sqrt{E_{nv1}^2 + E_{nv2}^2 + E_{nv3}^2 + E_{nv4}^2 + E_{nv5}^2} \quad (14-9)$$

W przypadku układu bez przetwarzania występują jedynie dwa pierwsze odcinki z

Rys. 14-2, co oznacza, iż wzór na wartość szumów napięciowych w danym paśmie wynosi jak na równaniu ( 14-10)

$$E_n = e_n \sqrt{f_{cu} \ln \left( \frac{f_g}{f_d} \right) + (f_g - f_d)} \quad (14-10)$$

Gdzie:  $e_n$  - wartość katalogowa szumów napięciowych wzmacniacza,  $f_{cu}$  - częstotliwość załamania charakterystyki napięciowej (corner noise),  $f_g$  – górna częstotliwość graniczna układu,  $f_d$  – dolna częstotliwość graniczna układu

Dla wzmacniacza z przetwarzaniem w paśmie do 16kHz w przypadku dokładnych obliczeń konieczne jest zastosowanie wszystkich wzorów z Tab. 14-1 i zsumowanie otrzymanych wartości według wzoru ( 14-9).

## 14.7 Całkowite szumy w układzie wzmacniacza TIA

Znając wartość poszczególnych wartości prądu, wartość szumów prądowych oraz napięciowych wzmacniacza można określić całkowite szumy odniesione do wejścia  $I_{ncalk}$  układu co przedstawia równanie ( 14-11).

$$I_{ncalk} = \sqrt{i_{nph}^2 + i_{nd}^2 + i_{nf}^2 + i_n^2 + i_{nf}^2 + \left( \frac{E_n}{R_f} \right)^2} \quad (14-11)$$

Gdzie:  $I_{ncalk}$  – całkowite szumy prądowe wzmacniacza operacyjnego,  $E_n$  – szumy napięciowe wzmacniacza operacyjnego w określonym paśmie częstotliwości

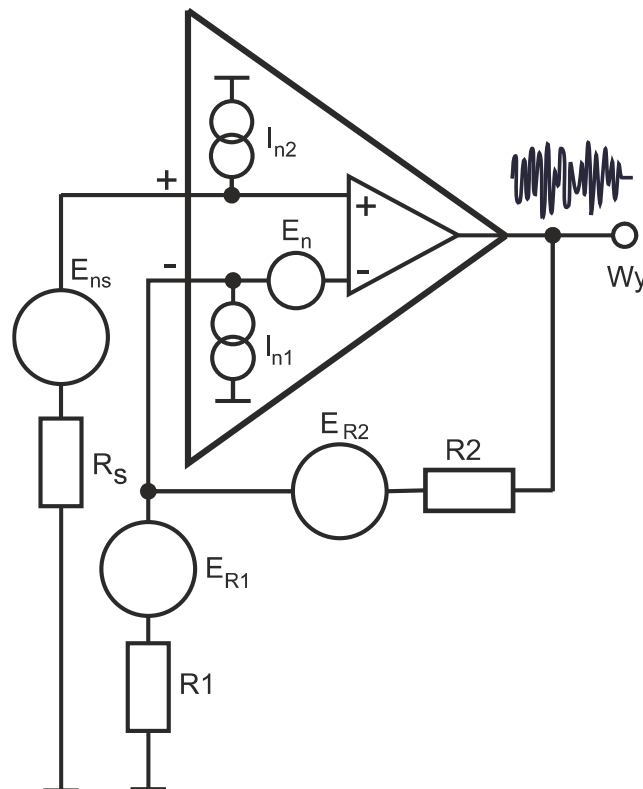
Aby określić skuteczną wartość napięcia szumów odniesiona do wyjścia układu należy posłużyć się równaniem ( 14-12).

$$U_{nwy} = -I_{ncalk}Z_f \quad (14-12)$$

Gdzie :  $U_{nwy}$  – skuteczne napięcie szumu odniesione do wyjścia,  $I_{ncalk}$  – suma całkowitych szumów prądowych odniesionych do wejścia,  $Z_f$  – wartość impedancji sprzężenia zwrotnego

## 14.8 Układ wzmacniacza nieodwracającego

Jako dwa końcowe kolejne stopnie detektora zastosowano dwa wzmacniacze w konfiguracji nie odwracającej. W celu dokładnej analizy przeprowadzono analizę szumową wzmacniacza nieodwracającego pozwalającą na obliczenie szumu wyjściowego. Zastosowany model szumowy do analizy przedstawia Rys. 14-3 [112].



Rys. 14-3 Schemat zastępczy wzmacniacza w konfiguracji nieodwracającej [112]

Szumy wzmacniacza operacyjnego można obliczyć znając jego charakterystykę szumową. Jeśli dany wzmacniacz posiada region szumów 1/f przy niskich częstotliwościach

oraz szerokość pasma projektowanego układu mieści się w obszarze szumu białego (region 1 oraz region 2 (według

Rys. 14-2). Wtedy równanie ( 14-13) przyjmuje następującą postać.

$$U_n = e_n \sqrt{f_{cu} \ln \left( \frac{f_g}{f_d} \right) + (f_g - f_d)}$$

( 14-13)

Gdzie:  $e_n$  – katalogowa wartość gęstości napięcia szumów,  $f_g$  – górna częstotliwość graniczna układu,  $f_d$  - dolna częstotliwość graniczna układu,  $f_{cu}$  – częstotliwość załamania charakterystyki napięciowej (corner noise)

Dla szumów prądowych wzór ( 14-14) wygląda następująco

$$I_n = i_n \sqrt{f_{ci} \ln \left( \frac{f_g}{f_d} \right) + (f_g - f_d)}$$

( 14-14)

gdzie:  $i_n$  – katalogowa wartość gęstości prądu szumów,  $f_g$  – górna częstotliwość graniczna układu,  $f_d$  - dolna częstotliwość graniczna układu,  $f_{ci}$  – częstotliwość załamania charakterystyki prądowej (corner noise)

Szumy termiczne generowane przez rezystancje w sprzężeniu zwrotnym można obliczyć stosując równinie ( 14-15).

$$E_n = \sqrt{4kT \left( \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \right) B}$$

( 14-15)

gdzie:  $E_n$  – wartość szumów termicznych sprzężenia zwrotnego,  $T$  – temperatura,  $k$  – stała Boltzmanna,  $R_1, R_2$  – rezystancja rezystorów,  $B$  – szerokość pasma układu

Szumy termiczne generowane przez wewnętrzną rezystancje źródła sygnału można obliczyć stosując równinie ( 14-16).

$$E_{ns} = \sqrt{4kTR_s B}$$

( 14-16)

gdzie:  $E_n$  – wartość szumów termicznych sprzężenia zwrotnego,  $T$  – temperatura,  $k$  – stała Boltzmanna,  $R_s$  – rezystancja źródła sygnału,  $B$  – szerokość pasma źródła sygnału

Składowymi całkowitego szumu wyjściowego odniesionego do wejścia są:

- szum termiczny źródła sygnału
- szum napięciowego źródła szumów
- szum wynikający z przepływu prądu przez rezystancję  $R_s$
- szum termiczny rezystorów znajdujących się w sprzężeniu zwrotnym
- szum wynikający z przepływu prądu przez rezystory w sprzężeniu zwrotnym

Całkowita wartość szumu odniesiona do wejścia jest sumą geometryczną poszczególnych napięć szumów co przedstawia równanie ( 14-17).

$$U_{nwe} = \sqrt{E_{ns}^2 + E_n^2 + (I_n * R_s)^2 + E_{R12}^2 + (I_n * R_{12})^2}$$

( 14-17)

Aby otrzymać wartość napięcia szumów na wyjściu układu wystarczy pomnożyć otrzymaną wartość przez współczynnik wzmocnienia ( $G$ ) wzmocnienia ustalonego przez rezystancje  $R_1$  oraz  $R_2$  jak wynika z równania ( 14-18).

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

( 14-18)

## 14.9 Całkowite szumy w układzie wzmacniacza nieodwracającego

Całkowite skuteczne napięcie szumu z układu wzmacniacza nieodwracającego na jego wyjściu możemy obliczyć z równania ( 14-19).

$$U_{nwy} = U_{nwe} * G$$

( 14-19)

## **14.10 Analiza szumowa układu przedwzmacniacza w oprogramowaniu LTspice XVII**

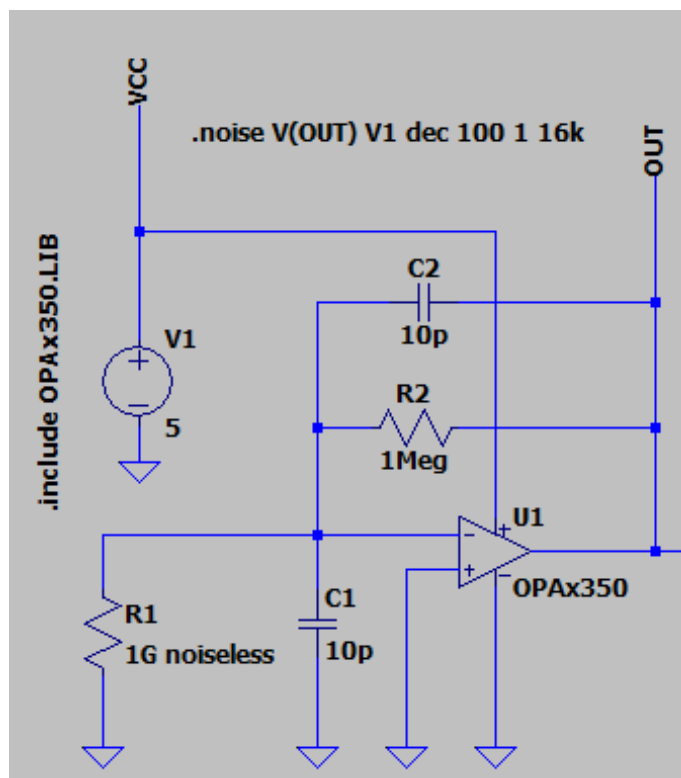
Mając na uwadze, iż tylko pierwszy stopień wzmacniacza ma największy wpływ na szumy w układzie, walidowano jedynie szumy w pierwszym stopniu wejściowym.

W celu sprawdzenia poprawności modelu szumowego przeprowadzono analizę szumową pseudo-transient w oprogramowaniu LTspice w wersji XVII, aby poznać całkowitą wartość szumu. Oprogramowanie przeprowadza analizę szumową w temperaturze 27°C (co ma wpływ na wartość szumów termicznych) oraz podaje całkowitą skuteczną wartość szumów odniesiona do wejścia w zadanym przedziale częstotliwości.

Rezystor R1 został opatrzony dyrektywą „noiseless” co spowodowało nie branie pod uwagę jego szumów termicznych.

W pierwszym przypadku zestawiano układ wzmacniacza TIA Rys. 14-4 wykorzystując wzmacniacz OPA350 firmy Texas Instruments. Model wzmacniacza został pobrany z oficjalnej strony produktu.





Rys. 14-4 Schemat układu wzmacniacza TIA poddanego symulacji

Symulacje przeprowadzono w paśmie od 1 do 16kHz, wzmacniacz został zasilony napięciem nie symetrycznym o wartości 5V. Jako rozdzielczość wyników wyjściowych określono 100 punktów na dekadę.

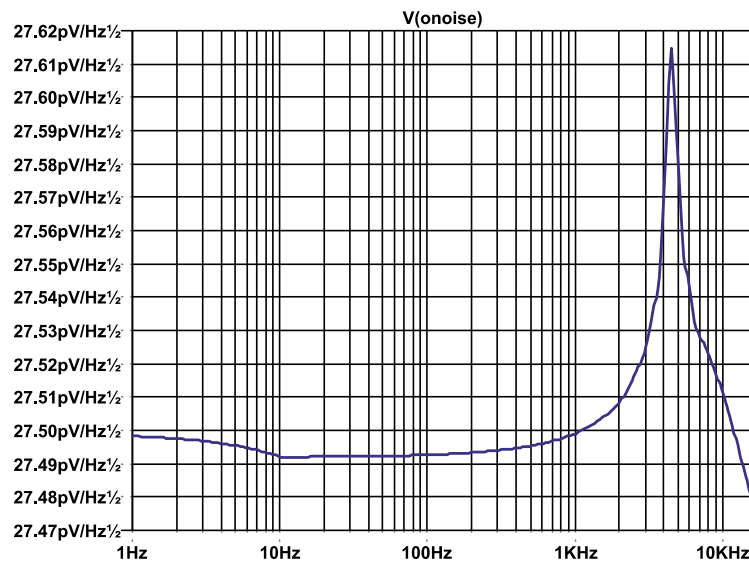
W drugim przypadku symulacja posiadała dokładnie takie same parametry. Jako wzmacniacz został użyty ADA4522-1 firmy Analog Devices. Model wzmacniacza był już domyślnie dołączony w bibliotekach oprogramowania LTspice XVII.

Wyniki symulacji przedstawia Rys. 14-5 oraz Rys. 14-6.



Rys. 14-5 Charakterystyka szumowa układu ze wzmacniaczem operacyjnym OPA350

Całkowita wartość szumu w układzie ze wzmacniaczem operacyjnym OPA350 wyniosła **27,443nV**, a bez uwzględniania szumów rezystancji rezystora R1 7,2509nV



Rys. 14-6 Charakterystyka szumowa układu ze wzmacniaczem operacyjnym ADA4522-1

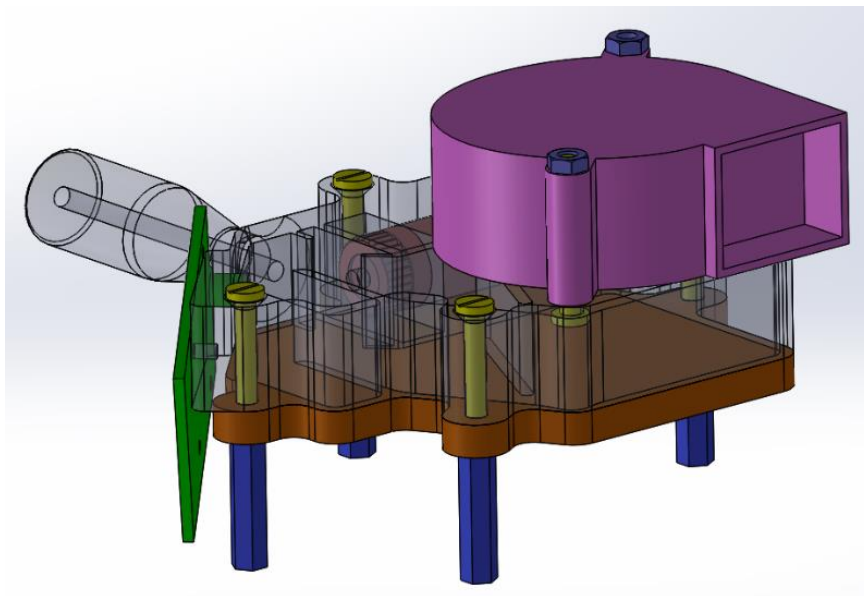
Całkowita wartość szumu w układzie ze wzmacniaczem operacyjnym ADA4522-1 wyniosła **3,4805nV**, a bez uwzględniania szumów rezystancji rezystora R1 3,3025nV

Zastosowanie wzmacniacza z przetwarzaniem spowodowało dziewięciokrotny spadek całkowitego napięcia szumu odniesionego do wejścia.

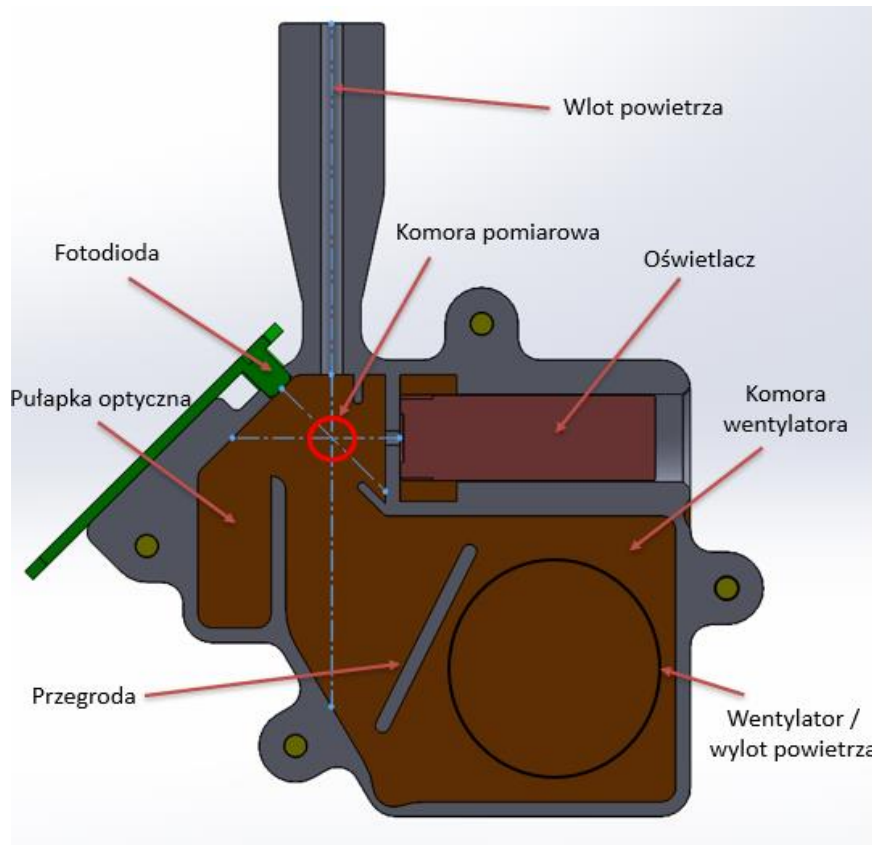
## 15. Rozwiązanie wykorzystujące wzmacniacz bez przetwarzania

### 15.1 Projekt oraz wykonanie komory pomiarowej sensora

Na podstawie innych rozwiązań oraz analizy literaturowej zaprojektowano model trójwymiarowy sensora. Komora pomiarowa została dopasowana do wymiarów oświetlacza oraz wentylatora o znormalizowanych wymiarach. W objętości komory zastosowano przegrodę mającą zapobiegać powrotowi proszku do miejsca pomiaru oraz wnękę realizującą funkcje pułapki optycznej.



Rys. 15-1 Projekt autorskiego sensora AS-ONE – komora pomiarowa



Rys. 15-2 Przekrój komory pomiarowej czujnika AS-ONE

Najważniejsze elementy konstrukcyjne sensora to :

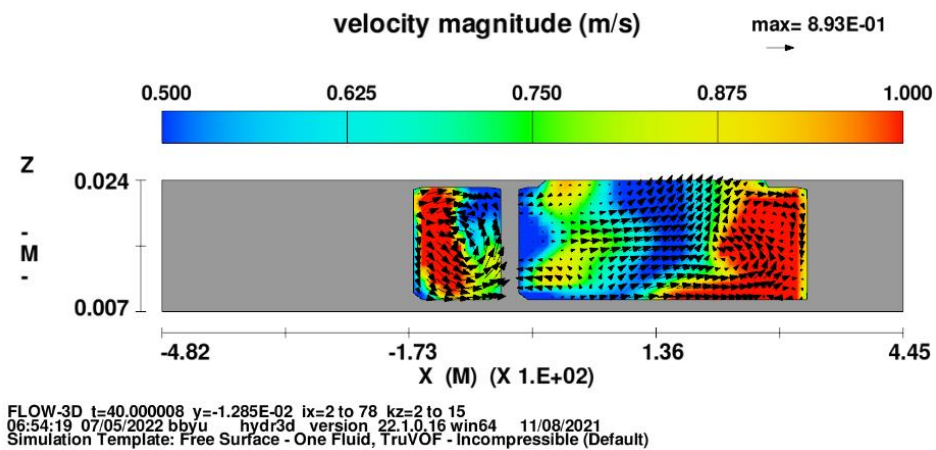
- **Wlot powietrza** – zapewnia laminarny przepływ cząstek proszku zasysania powietrza z zewnątrz układu.
- **Fotodioda z układem elektronicznym** – przekształca sygnał optyczny na sygnał prądowy.
- **Oświetlacz laserowy** – zapewnia oświetlenie celi pomiarowej znajdującej się na przecięciu osi optycznej oświetlacza oraz osi kanału, którym zasysane są cząstki z proszkiem.
- **Pułapka optyczna** – zapobiega powstawaniu dodatkowych refleksów światła, które mogłyby zaburzyć pomiar.
- **Przegroda** – zapewnia odpowiedni przepływ powietrza w komorze wentylatora oraz zapobiega powrotowi cząstek w stronę kanału wlotowego. Wentylator zapewnia zasysanie cząstek pyłu do urządzenia z odpowiednią wydajnością.

Na podstawie modelu trójwymiarowego komory wykonano symulacje CFD (*computational fluid dynamics*).

Jako warunki brzegowe przyjęto:

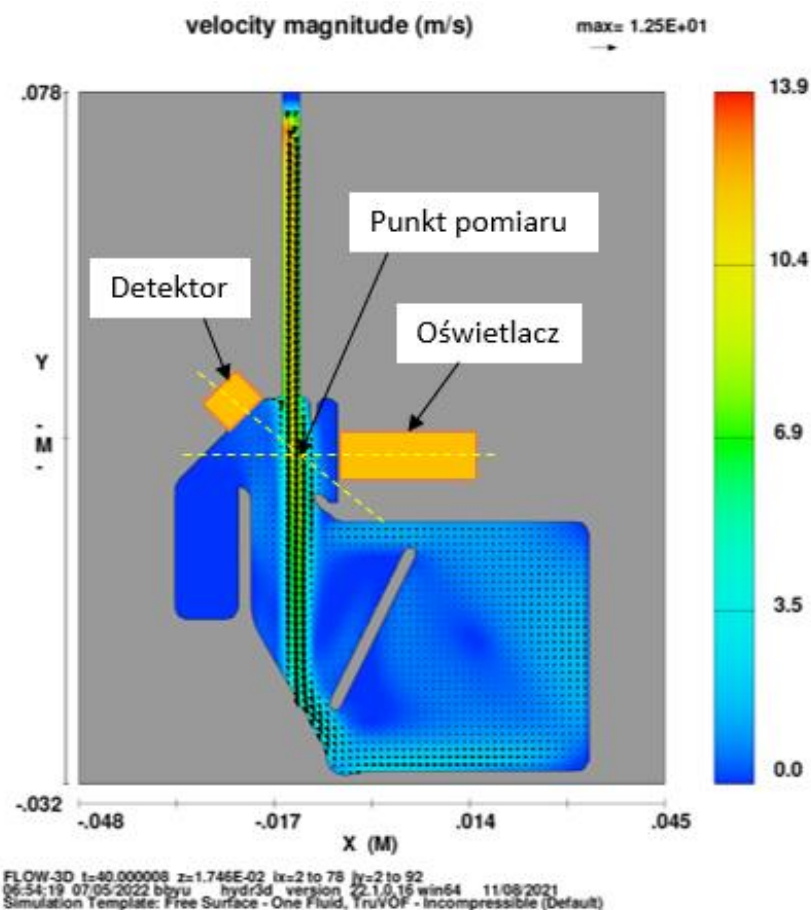
- minimalną prędkość zasysania cząstek proszku stali MS1 o średnim uziarnieniu wynoszącym  $50\ \mu\text{m}$  (obliczonej z równań Naviera-Stokesa Rys. 12-9),
- czas symulacji 40 s.

Analiza została przeprowadzona w oprogramowaniu flow 3D (wersja 22.1.0.16).



Rys. 15-3 Przekrój komory sensora z kanałem wylotowym

Celem symulacji było oszacowanie wydajności wentylatora zasysającego powietrze do komory pomiarowej (Rys. 15-3) oraz ustalenie czy w punkcie przecinania się wiązki oświetlacza z ziarnami proszku występuje laminarny przepływ powietrza (Rys. 15-4), zapewniający fizyczne warunki założeniom teoretycznym.



Rys. 15-4 Przekrój komory sensora z oznaczonym kierunkiem przepływu oraz wartościami

Po wstępnych badaniach oraz symulacjach zaprojektowano i wykonano innowacyjny czujnik AS ONE. Zaprojektowano komorę pomiarową z detektorem, wentylatorem i oświetlaczem, co przedstawia Rys. 15-1, a przekrój komory pomiarowej Rys. 15-2. Komora czujnika została wykonana w technologii FDM z czarnego polilaktydu (PLA ” UltraPLA Noctuo Filaments).

Detektor wykorzystuje fotodiode PIN (BPX 65 [150]). Kąt pomiędzy oświetlaczem, a detektorem wynosi około 28 stopni. Moc diody laserowej oświetlacza wynosi 5 mW, a długość fali dla oświetlacza laserowego wynosi 650 nm. Wentylator używany do zasysania cząstek proszku jest zasilany napięciem 12 V, a jego przepływ wynosi 9,85 m<sup>3</sup>/h.

## 15.2 Warunki eksperymentu dla autorskiego sensora zapylenia

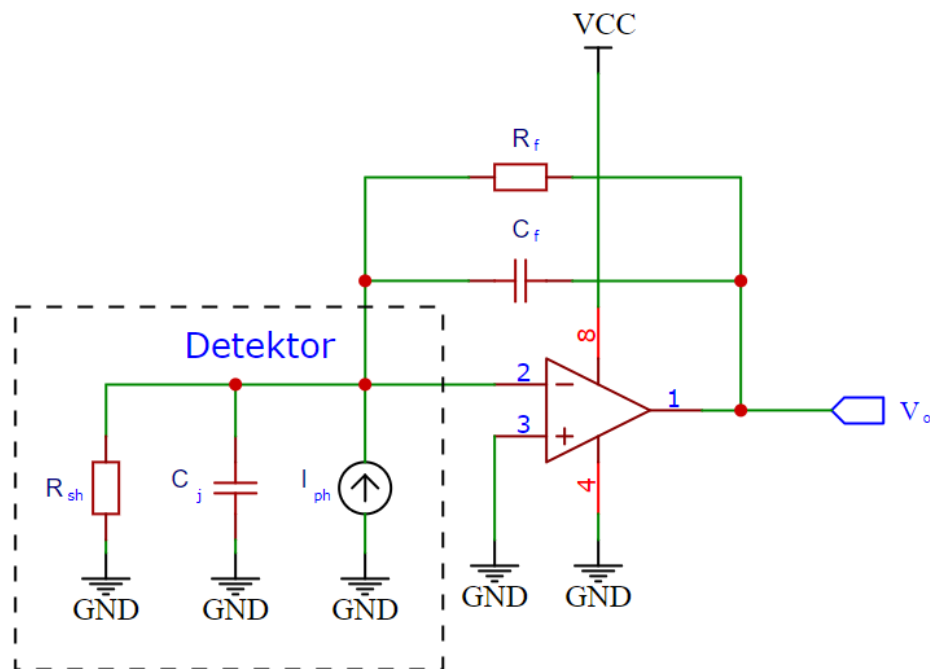
Sensor AS one był testowany bez wymuszonego przepływu powietrza znajdując się w środku geometrycznym komory testowej. Dozowanie proszku odbywało się przy

pomocy działa pneumatycznego znajdującego się w pokrywie komory podobnie jak w przypadku testów w z modułami SDS198.

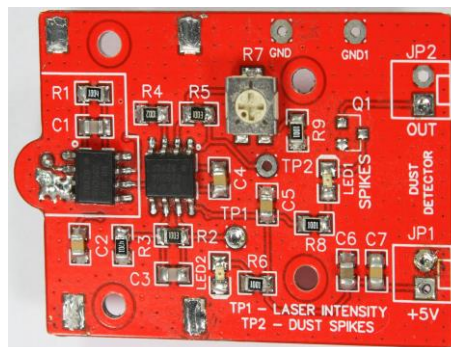
### 15.3 Układ elektroniczny oraz rejestracja impulsów

Jako detektor zastosowano fotodiode PIN ze względu na małą pojemność złącza i krótki czas odpowiedzi układu. W układzie przedwzmacniacza transimpedancyjnego Dioda PIN w obudowie TO18 była podłączona bezpośrednio do wejścia odwracającego wzmacniacza.

Podstawowy układ TIA wraz z przedstawieniem rezystancji wewnętrznej fotodiody oraz pojemności złącza przedstawia Rys. 15-5.

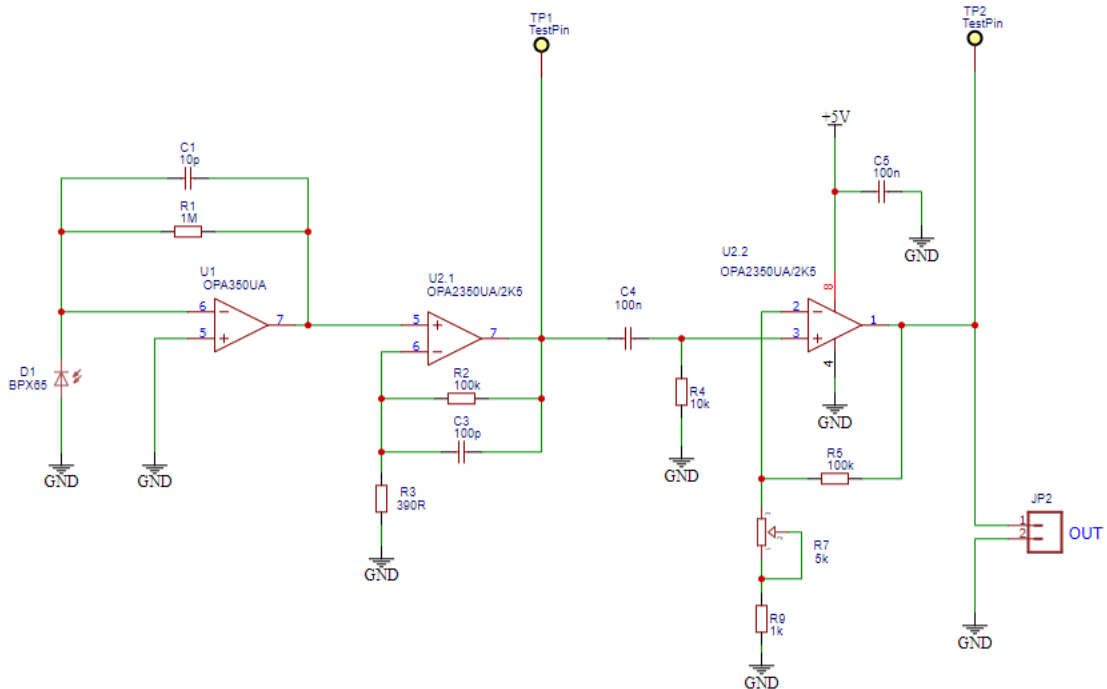


Rys. 15-5 Układ przedwzmacniacza transimpedancyjnego (TIA) [151]



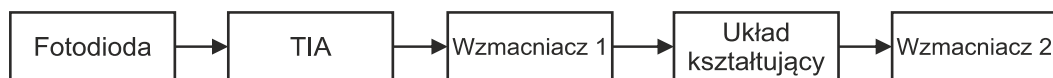
Rys. 15-6 Zmontowana płytki sensora bez przetwarzania.

Schemat detektora bez przetwarzania przedstawia Rys. 15-7, a zmontowany układ znajduje się na Rys. 15-6.



Rys. 15-7 Schemat detektora bez przetwarzania

W układzie detektora zastosowano wzmacniacze operacyjne OPA350, ze względu na niski poziom szumów prądowych, napięciowych i niski wejściowy prąd polaryzacji [125]. Całkowite wzmocnienie obwodu detektora wynosiło około 190 dB  $\Omega$ . Schemat blokowy detektora bez przetwarzania ilustruje Rys. 15-8.



Rys. 15-8 Schemat blokowy sensora

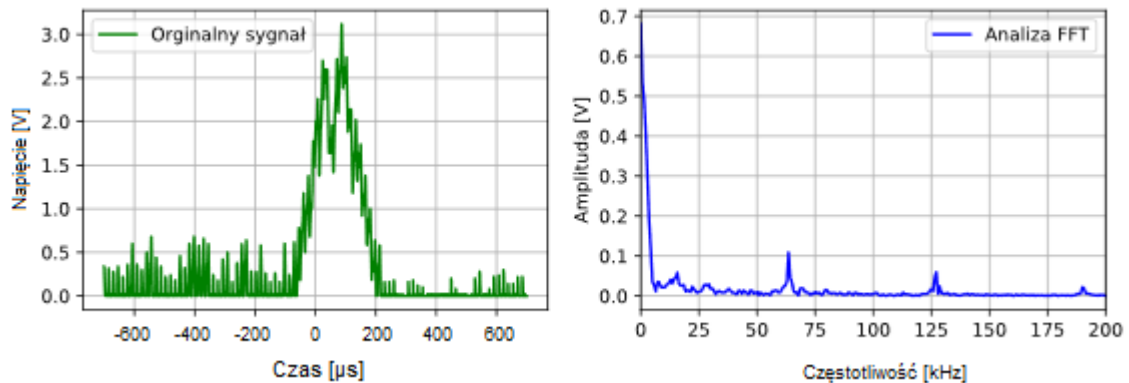
Ze względu na optymalizację układu pod względem szumowym oraz pojemność detektora (diody p-i-n) ustalono szerokość pasma wynoszącą 16 kHz. Stała czasowa układu kształtującego (shapera) wynosiła 1 ms. W pętli sprzężenia zwrotnego układu TIA umieszczono rezystor 1 M $\Omega$  ( $R_f$ ) i kondensator 10 pF ( $C_f$ ) (Rys. 15-5).

Rezystor  $R_f$  umożliwia rozładowywanie kondensatora  $C_f$  i ustala górną częstotliwość graniczną układu. Impulsy wyjściowe zarejestrowano w punkcie TP2 (Rys. 15-7)



oscyloskopem Siglent SDS2204X w postaci plików csv w celu późniejszego przetwarzania w dedykowanym programie napisanym w języku Python [152] stworzonym na potrzeby analizy.

Zebrane impulsy zapisane w formacie pliku csv poddano analizie. Wstępnie przeprowadzono analizę FFT Rys. 15-9 za pomocą skryptu stworzonego w języku Python [152,153], aby określić zawartość częstotliwości pasożytniczych na wyjściu wzmacniacza 2 w układzie detektora (Rys. 15-8).



Rys. 15-9 Analiza sygnału wyjściowego w domenie czasu oraz częstotliwości bez ekranowania

Wykryto częstotliwości pasożytnicze o wartościach 63 kHz, 126 kHz oraz 190 kHz (Rys. 15-9), które powodowały zniekształcenia sygnału (Rys. 15-12), co wpływało niekorzystnie na działanie komparatora w układzie detekcji. Przy paśmie przenoszenia układu wynoszącym 16kHz.

Aby przeciwdziałać zakłóceniom, użyto przewodów ekranowych do zasilania części analogowej oraz zastosowano przewód ekranowany do zasilania wentylatora.

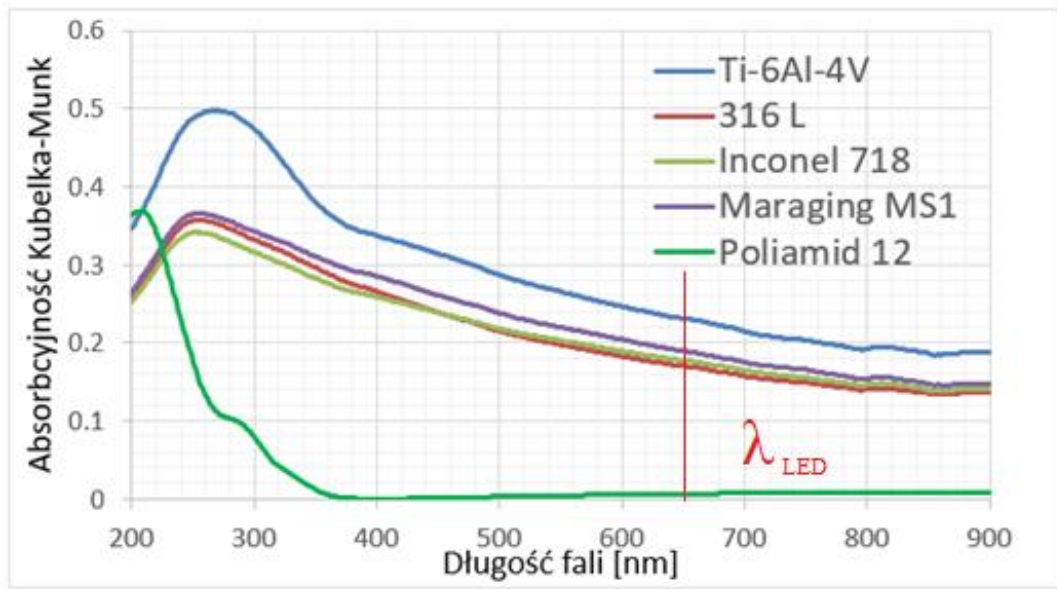
Po zastosowaniu ekranowania zawartość częstotliwości pasożytniczych zmalała o 75%, co widać na Rys. 15-13. Przy znacznej poprawie sygnału wyjściowego porównano skuteczność filtrowania, używając filtrów dolnoprzepustowych wyższych rzędów. Działanie to miało na celu określenie optymalnej metody filtracji dla zarejestrowanych impulsów, co przedstawia Rys. 15-14, Rys. 15-15 oraz Rys. 15-16.

## 15.4 Wstępny dobór wzmocnienia układu

W celu ustalenia wstępnego wzmocnienia układu detektora konieczne było ustalenie parametrów badanego materiału. Z powodu nieznanego współczynnika absorpcji dla proszków stosowanych w procesach SLS/SLM zlecono badanie spektrofotometryczne.

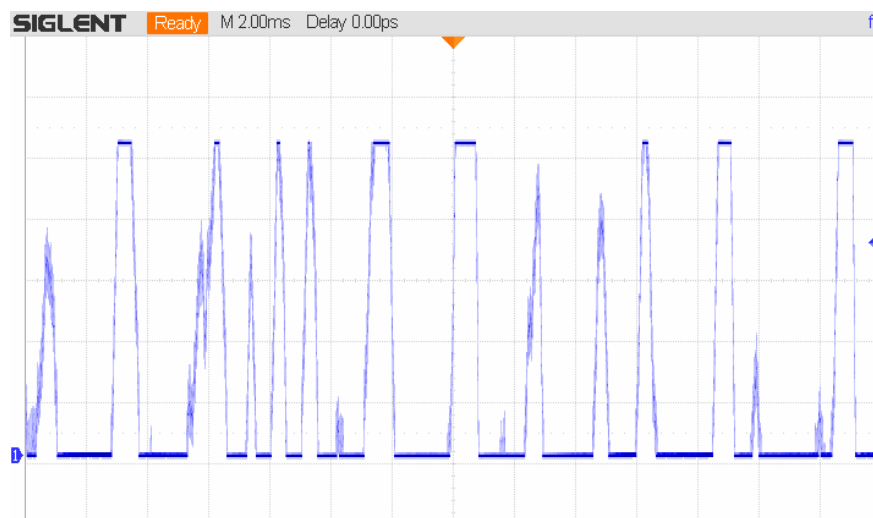
Wyniki badań (Rys. 15-10) wykazały iż układ bez większych modyfikacji może zostać zastosowany do dwóch innych materiałów stosowanych w procesach PBF.

Badania spektrofotometryczne przeprowadzono metodą odbicia rozproszonego dla dostarczonych próbek w postaci proszku, stosowanych w procesach PBF. Badania wykonano na aparacie Thermo Scientific Evolution 220 w zakresie długości fal 200-900 nm. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawia Rys. 15-10.



Rys. 15-10 Wyniki badań spektrofotometrycznych ( $\lambda_{LED}$  - długość fali zastosowanego oświetlacza)

Pomimo wcześniejszych symulacji podczas pierwszych prób dochodziło do nasycania się wzmacniacza w stopniu wyjściowym układu, co pokazano na Rys. 15-11.

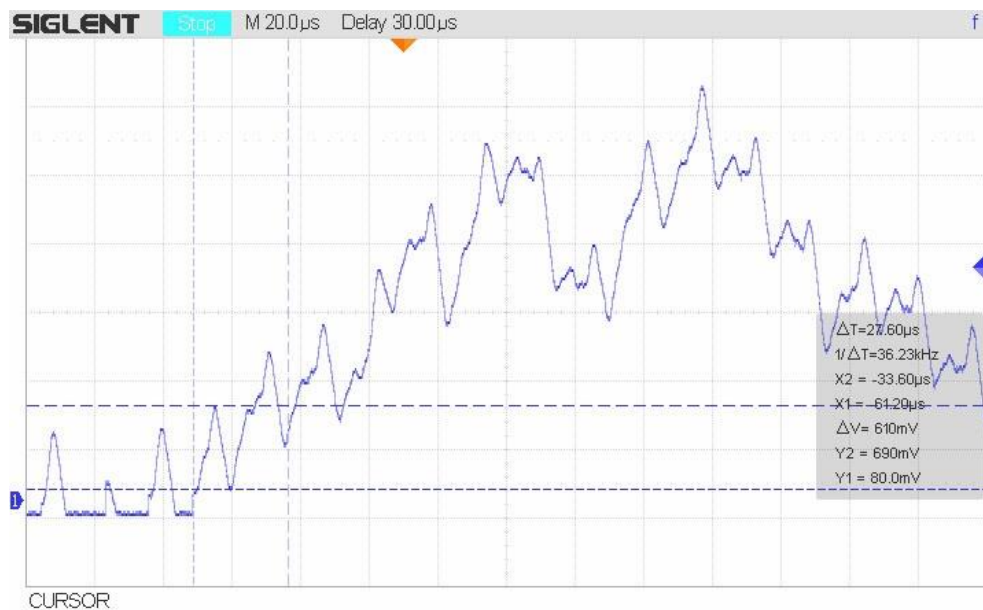


Rys. 15-11 Seria impulsów z układu o niedopasowanym wzmacnieniu (napięcie w funkcji czasu)

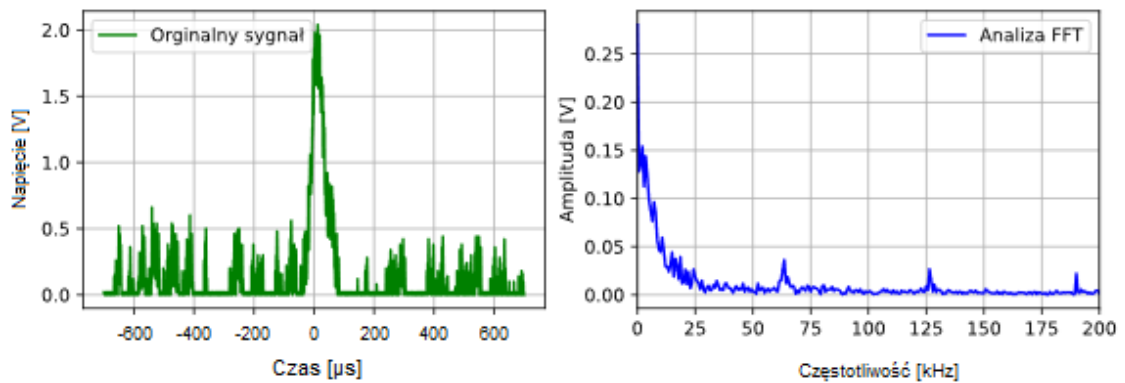
Po zmniejszeniu wzmocnienia w drugim stopniu układu, dostosowano zakres napięcia wyjściowego do zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego.

## 15.5 Synteza cyfrowa wybranych filtrów (DSP)

Tab. 15-1 przedstawia zestawienie amplitud sygnału wyjściowego dla danego rodzaju filtracji gdzie wartość częstotliwości granicznej dla każdego filtru wynosiła 16 kHz.



Rys. 15-12 Pomiar tętnień w sygnale wyjściowym z detektora



Rys. 15-13 Analiza sygnału wyjściowego w domenie czasu oraz częstotliwości po dodaniu ekranowania

Tab. 15-1 Zestawienie amplitud sygnału wyjściowego dla danego rodzaju filtracji

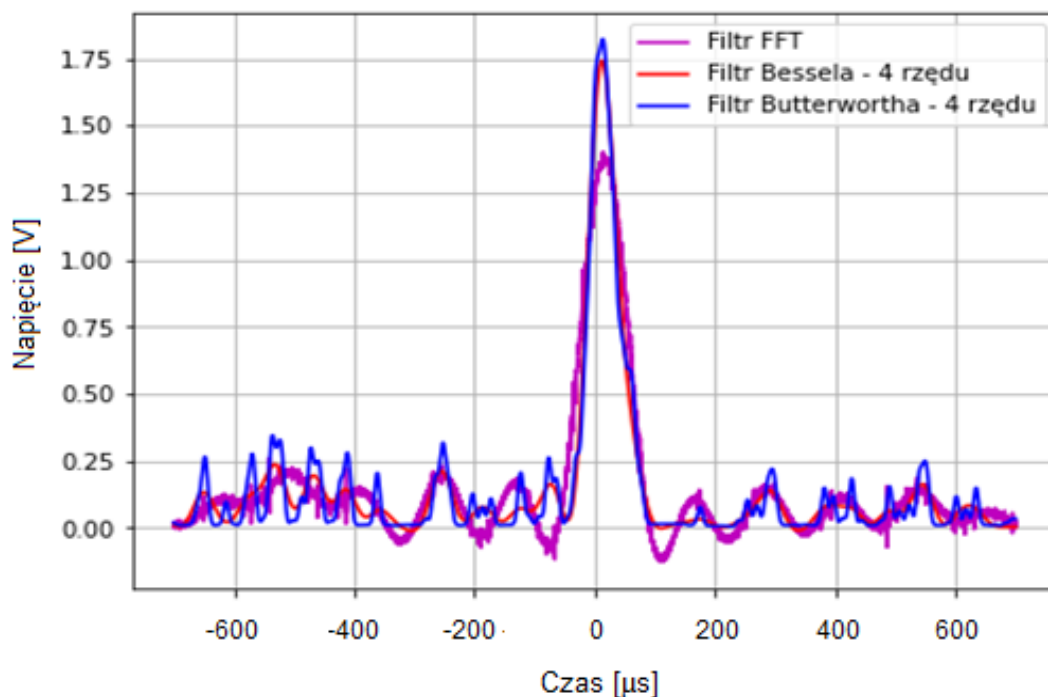
Rząd filtru	Nazwa filtru	Amplituda [V]	Kowariancja	Uwagi
-	-	2,04	-	Bez filtracji
-	FFT	1,400	0,073	Rys. 15-14
4	Filtr Bessela	1,823	0,086	Rys. 15-14
4	Filtr Butterwortha	1,741	0,082	Rys. 15-14
8	Filtr Bessela	1,792	0,084	Rys. 15-15
Wielomian 1 st.	Savitzky-Golay	1,811	0,083	Rys. 15-16

Ze względu na nieznaną charakter zakłóceń ani znajomość źródła oraz częstotliwości pasożytniczej przeprowadzono analizę FFT (Rys. 15-13).

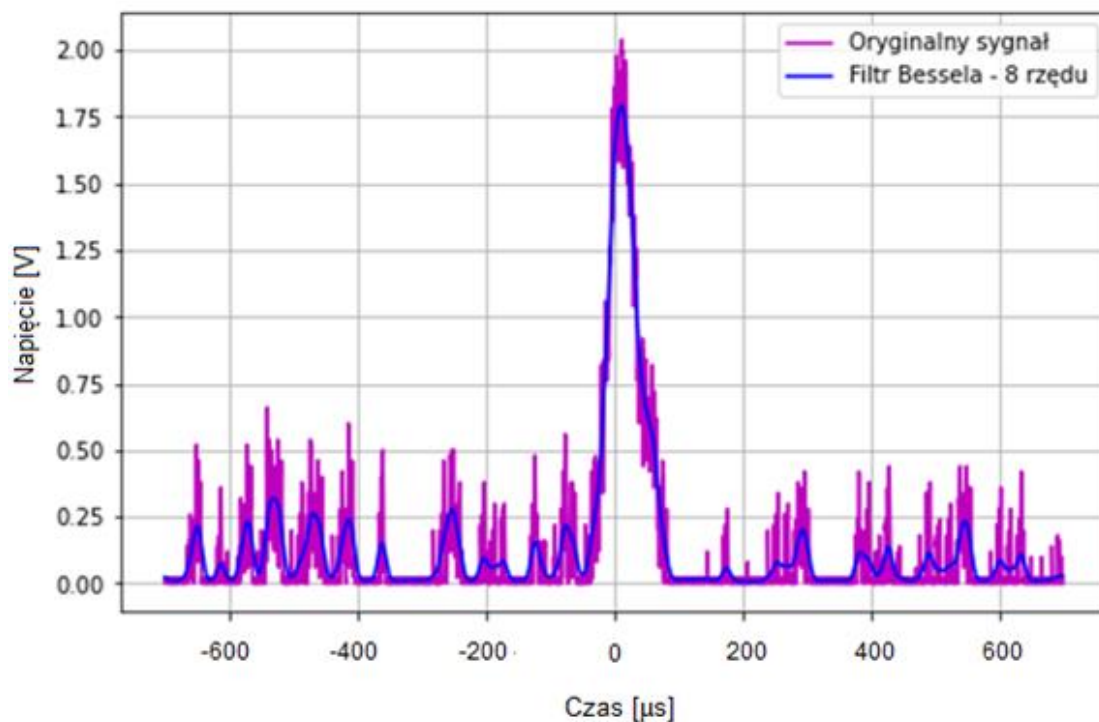
Analiza wykazała obecność wyższych częstotliwości w sygnale z przedziału od 60 kHz do 185 kHz.

Synteza cyfrowa filtrów miała na celu ustalenie najlepszego sposobu filtracji sygnału oraz określenia zniekształceń, które są wnoszone do sygnału na skutek działania filtrów co przedstawia Tab. 15-1.

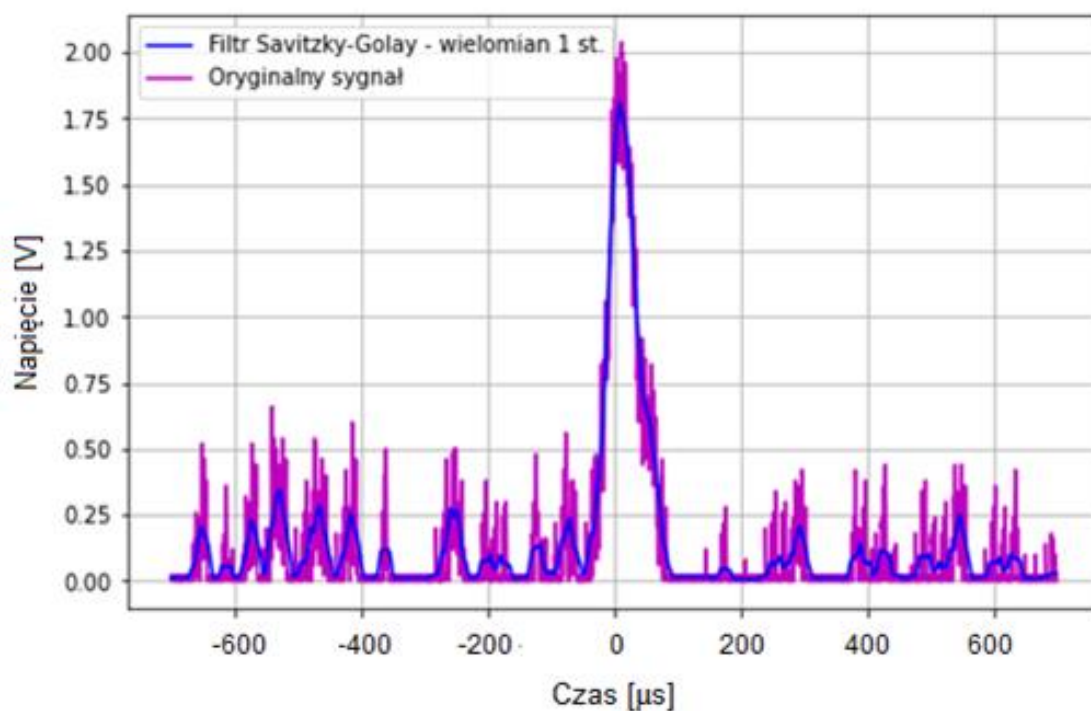
Wybrane filtry oraz zastosowane algorytmy filtracji zostały zoptymalizowane pod kątem eliminacji szumów oraz amplitudy wyjściowej co przedstawia Rys. 15-14, Rys. 15-15 oraz Rys. 15-16.



Rys. 15-14 Porównanie amplitudy sygnału po użyciu filtrów wyższego rzędu



Rys. 15-15 Działanie filtru Bessela ósmego rzędu na sygnale wyjściowym z detektora



Rys. 15-16 Działanie filtru Savitzky-Golay (okno 199 próbek, 1 stopień wielomianu, 14kS) na sygnale wyjściowym z detektora

## 15.6 Pomiar szumów w układzie detektora bez przetwarzania

Po przeprowadzeniu syntezy filtrów przy użyciu języka Python [153] i biblioteki SciPy [154] w wersji 1.8.0 przystąpiono do pomiarów mających na celu wyznaczenie poziomu szumu oraz zidentyfikowanie źródeł szumów w układzie detektora. Analiza szumowa obejmowała pomiar średniej arytmetycznej wartości RMS szumu z 100 zebranych ramek przy pomocy oscyloskopu i zawężonym paśmie toru wejściowego do 20 MHz. Po zebraniu próbek w formacie csv wyznaczono widmową gęstość mocy (PSD – *Power Spectral Density*) w celu określenia wartości oraz charakteru szumu.

W celu wyznaczenia poziomu szumu zastosowano funkcję `matplotlib.pyplot.psd()` argumenty funkcji dostosowano aby otrzymać rozdzielczość jednego punktu na 100Hz. poprzez ustalenie odpowiedniej wartości argumentu *NFFT*. Każdy segment o długości określonej argumentem *NFFT* jest okienkowany domyślnie poprzez okno Hanna (Hanninga) [155]. Częstotliwość próbkowania *Fs* dla funkcji `matplotlib.pyplot.psd()` wynosiła połowę częstotliwości próbkowania oryginalnego sygnału.

Funkcja oblicza spektralną gęstość mocy metodą Welch [156,157] (zwana również metodą periodogramu) [158], metoda ta opiera się na koncepcji wykorzystania periodogramów estymat widma, które są wynikiem konwersji sygnału z domeny czasu na domenę częstotliwości (podobnie jak w transformacji Fouriera). Metoda Welch jest przeznaczona do estymacji widm mocy najczęściej nieokresowych sygnałów. Operacja ta jest realizowana poprzez: podzielenie sygnału na bloki, utworzenie periodogramu dla każdego bloku oraz uśrednieniu wartości. Inaczej ujmując, jest to średnia periodogramów w czasie.

Ze względu na szum spowodowany przez niedoskonałe i skończone dane, często pożądana jest redukcja szumów co jest otrzymywane podczas obliczania spektralnej gęstości mocy metodą Welch.

Pomiary szumu przeprowadzono w trzech wariantach co przedstawia Tab. 15-2.

Tab. 15-2 Plan pomiarów szumu w detektorze bez przetwarzania

	Wentylator	Oświetlacz
I	Wyłączony	Wyłączony
II	Wyłączony	Włączony
III	Włączony	Włączony

Wartości szumu w detektorze bez przetwarzania przedstawia Tab. 15-3

Tab. 15-3 Wartości szumu w układzie detektora bez przetwarzania

Przypadek według Tab. 15-2	Amplituda szumu [mV <sub>RMS</sub> ]	Gęstość mocy (PSD) [dB/Hz]
I	33,53	-140
II	143,10	-75
III	284,30	-70

Jak widać w Tab. 15-3 szum po włączeniu oświetlacza wzrósł do -75 dB. Przy włączonym zasilaniu układu, oświetlaczu oraz wentylatorze szum wzrósł do -70 dB, co wykazuje wpływ działania wentylatora na układ.

## 15.7 Analiza otrzymanych wyników

Korzystając z twierdzenia, iż każdy filtr analogowy można zrealizować w formie równoważnego filtra cyfrowego [135], zebrane wyniki zapisane w formacie pliku csv zaimportowano do analizy. W programie zdefiniowano próg wyzwalania komparatora oraz zdecydowano się na zastosowanie kilku metod filtracji sygnału. We wszystkich przypadkach wykorzystano filtry dolnoprzepustowe o częstotliwości granicznej wynoszącej 16 kHz.

- W przypadku filtracji algorytmem Savitzky–Golay z wielomianem pierwszego stopnia wartość progu wyzwalania dla komparatora wynosiła 0,65 V z histerezą o wartości 0,35 V szerokość okna wynosiła 199 próbek.

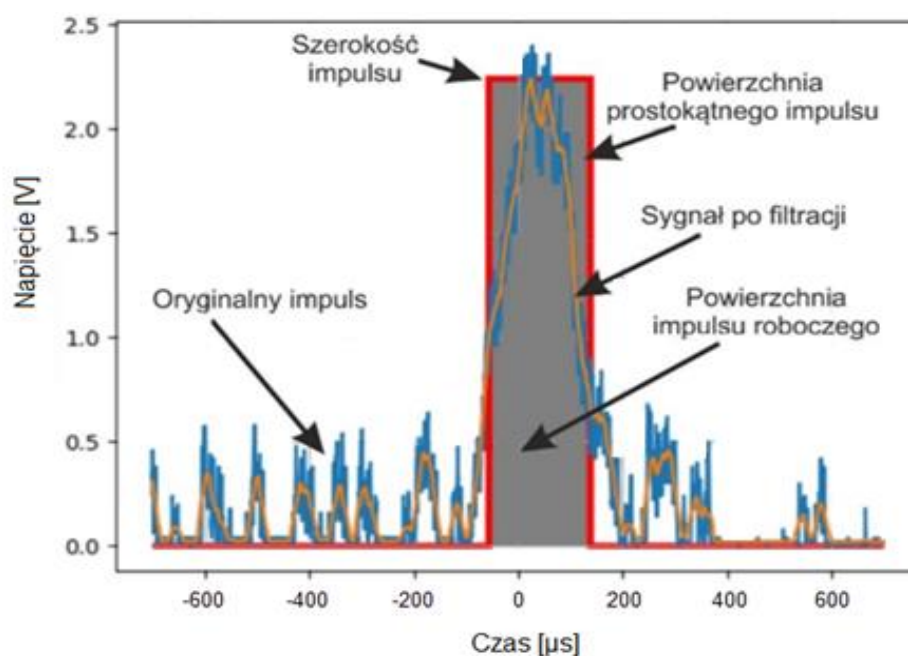
Po wstępnej analizie wyników oraz na podstawie danych literaturowych ustalono próg detekcji impulsów wynoszący 1 V [37].

- Podczas filtracji algorytmem Savitzky–Golay z wielomianem drugiego stopnia wartość progu wyzwalania dla komparatora wynosiła 1 V z histerezą o wartości 3 mV, a szerokość okna wynosiła 569 próbek.

- Przy zastosowaniu wszystkich filtrów Bessela wartość progu wyzwalania dla komparatora wynosiła 1 V z histerezą o wartości 3 mV.

Po przetworzeniu impulsów skrypt zwracał w postaci numerycznej :

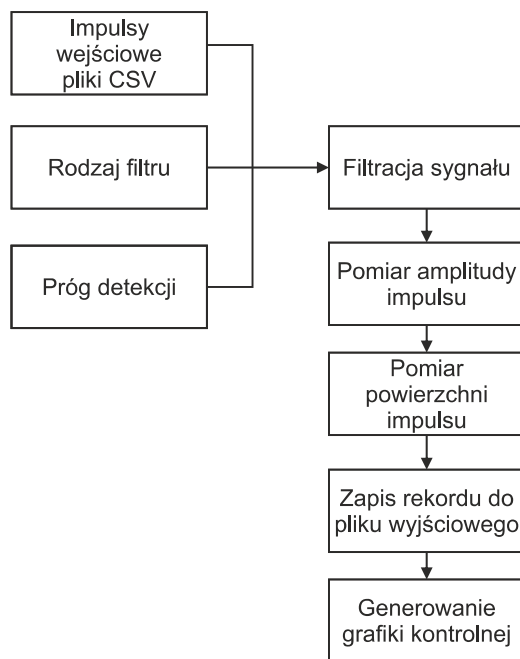
- **Powierzchnię impulsu roboczego** - w granicach ustalonego progu wyzwalania po użyciu wybranego filtru,
- **Powierzchnię impulsu prostokątnego** - opisanego na sygnale wejściowym,
- **Szerokość impulsu kwadratowego** - opisanego na sygnale oryginalnym.
- **Amplitudę wykrytego impulsu** – lub impulsów w zarejestrowanej ramce



Rys. 15-17 Grafika wygenerowana z analizy przykładowego impulsu wraz z opisem

Dla każdego przetwarzanego impulsu generowano grafikę sprawdzającą poprawność działania algorytmu przetwarzania sygnału. Jedną z wygenerowanych grafik wraz z opisem pokazano na Rys. 15-17. Zasadę działania programu do analizy impulsów przedstawia Rys. 15-18.

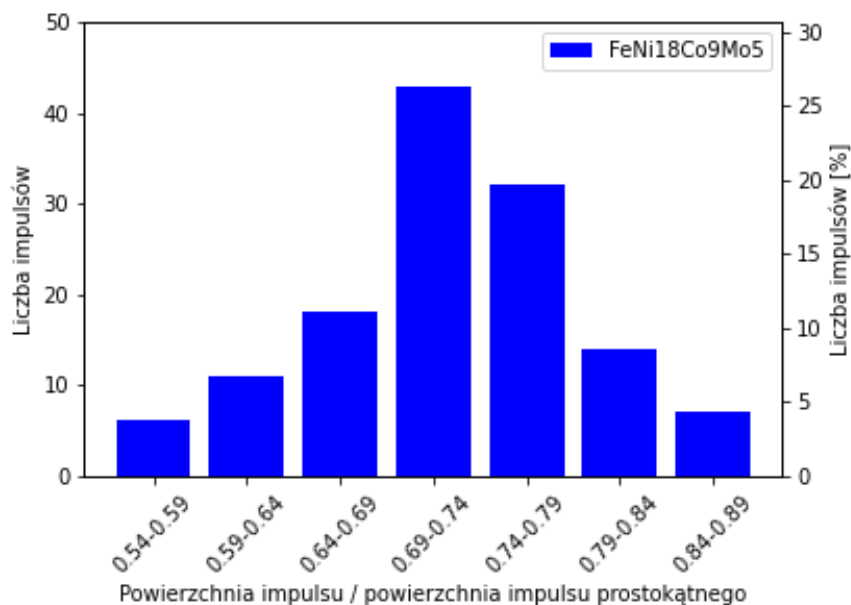




Rys. 15-18 Schemat działania algorytmu przetwarzania impulsów

Zebrane dane zestawiono na histogramie zawierającym 6 kolumn, aby porównać otrzymane wyniki zebrane z wyjścia detektora do danych otrzymanych z analizy sitowej (Rys. 12-4).

Stosunek pola powierzchni impulsu roboczego do pola impulsu prostokątnego jest rozkładem normalnym, co przedstawia Rys. 15-19.



Rys. 15-19 Zależność między stosunkiem powierzchni impulsu roboczego do powierzchni impulsu prostokątnego (filtr Savitzky–Golay z wielomianem pierwszego stopnia)

Tab. 15-4 Przedstawia zestawienie wyników pomiarów dla różnych metod filtrowania sygnału wyjściowego z detektora.

Tab. 15-4 Zestawienie wyników pomiarów dla detektora bez przetwarzania oraz różnych metod filtracji sygnału

Nazwa filtru	Rząd filtru	Wielkość cząstek proszku						Ilość wykrytych impulsów
		<25 $\mu$ m	25-32 $\mu$ m	32-45 $\mu$ m	45-63 $\mu$ m	63-90 $\mu$ m	>90 $\mu$ m	
Filtr Bessela	2	34	68	33	11	6	1	153
Filtr Bessela	4	34	68	33	11	6	1	153
Filtr Bessela	8	43	64	37	10	8	1	163
Filtr Savitzky–Golay	Wielomian 1 st.	18	62	34	10	6	1	131
Filtr Savitzky–Golay	Wielomian 2 st.	34	69	29	11	5	1	149

Jak widać w tabeli Tab. 15-4 filtracja filtrem Bessela drugiego oraz czwartego rzędu nie wnosi żadnej poprawy. Ilość wykrytych impulsów oraz ilość impulsów w danych przedziałach pozostaje bez zmian.

W przypadku filtru Bessela ósmego rzędu ilość impulsów względem filtrów Bessela niższego rzędu zwiększyła się o 6,5 %. Największa różnica wykrytych impulsów została zaobserwowana w przedziale najmniejszych cząstek.

Filtracja algorytmem Savitzky–Golay z zastosowaniem wielomianu pierwszego stopnia spowodowało spadek wykrytych impulsów o 19,5 % w porównaniu z filtrem Bessela ósmego rzędu. Największa różnica wykrytych impulsów została zaobserwowana w przedziale najmniejszych cząstek.

Zastosowanie filtracji algorytmem Savitzky–Golay z zastosowaniem wielomianu drugiego stopnia spowodowało spadek wykrytych impulsów o 8,6 %, w porównaniu z filtrem Bessela ósmego rzędu. Największa różnica wykrytych impulsów została zaobserwowana w przedziale najmniejszych cząstek.

## 16. Rozwiązanie wykorzystujące wzmacniacz z przetwarzaniem

### 16.1 Modyfikacje detektora

Zdecydowano się na znaczne modyfikacje układu mające na celu obniżyć poziom szumu aby układ mógł wykrywać mniejsze cząstki proszku. Po wstępnej analizie wyników oraz zapoznaniu się z rozwiązaniami stosowanymi między innymi w licznikach Geigera-Millera oraz w spektroskopii [110,111,159] zdecydowano się na zastosowanie wzmacniacza z przetwarzaniem ADA4522 posiadającego niemal, że płaską charakterystykę szumową w zakresie niskich częstotliwości (Rys. 8-6).

Najważniejszą zmianą w układzie było zastosowanie w stopniu wejściowym wzmacniacza z przetwarzaniem ADA4522 (Rys. 16-1) oraz przeprojektowanie płytki, ponieważ układ nie był dostępny w obudowie, która pozwalała na bezpośrednią wymianę układu scalonego na PCB (*printed circuit board*) (Rys. 16-2) bez wprowadzania zmian.

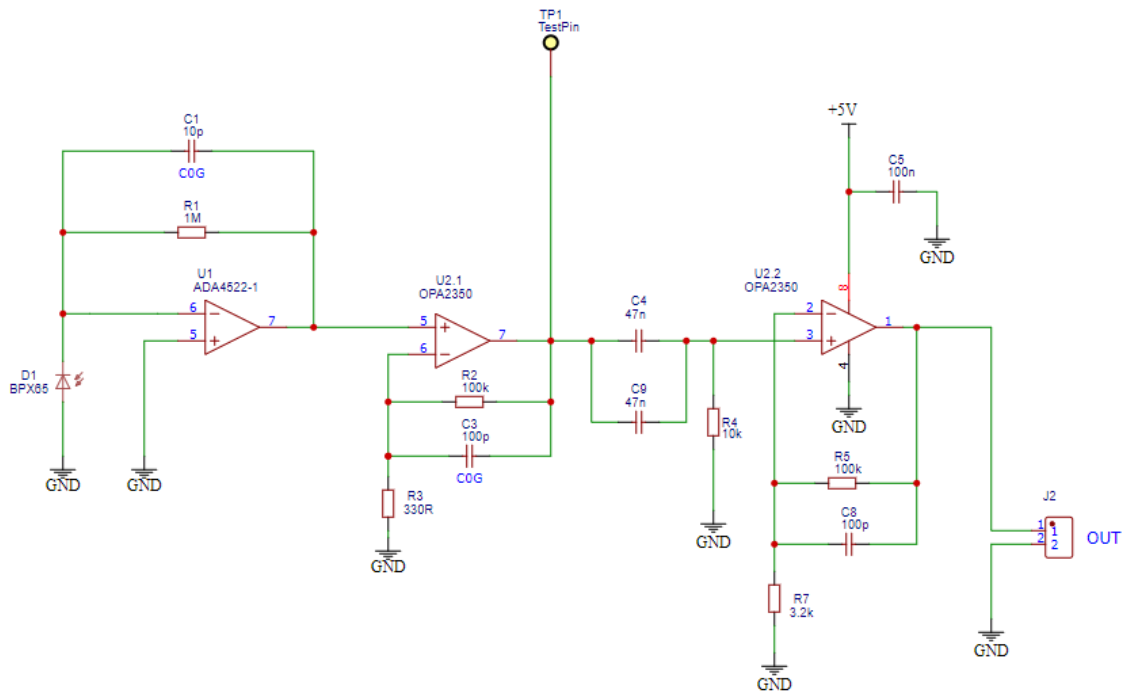
W układzie przedwzmacniacza transimpedancyjnego w pętli sprzężenia zwrotnego zmieniono rezystor cienkowarstwowy o tolerancji 1% na rezystor metalizowany (o takich samych wymiarach zewnętrznych) o tolerancji 0.1%.

Kondensatory ceramiczne z izolatorem X7R zostały zmienione na kondensatory z izolatorem C0G, aby zminimalizować efekt piezoelektryczny w torze sygnału wyjściowego ze względu na obecność w układzie wentylatora i możliwości powstania rezonansów mechanicznych.

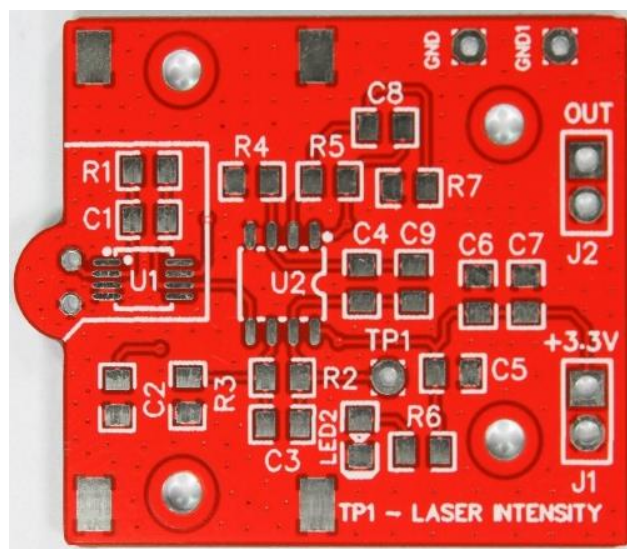
Kondensatory odsprężające pozostawiono z izolatorem X7R. Z powodu małych rozmiarów płytki detektora oraz konieczności stosowania elementów (tylko po jednej stronie PCB) nie zdecydowano się na użycie kondensatorów styrofleksowych lub polipropylenowych na płycie detektora.

Dodatkowo zastosowano filtr dolnoprzepustowy w układzie stopnia wyjściowego, ograniczając wpływ wyższych częstotliwości na końcowy stopień wyjściowy zrealizowany na wzmacniaczu U2.2 (Rys. 16-1).

W układzie sprzężenia zwrotnego pozostałych dwóch wzmacniaczy operacyjnych zastosowano rezystory cienkowarstwowe o tolerancji 1%. Potencjometr montażowy został zastąpiony rezystorem o stałej wartości po ustaleniu wartości wzmocnienia dla detektora.



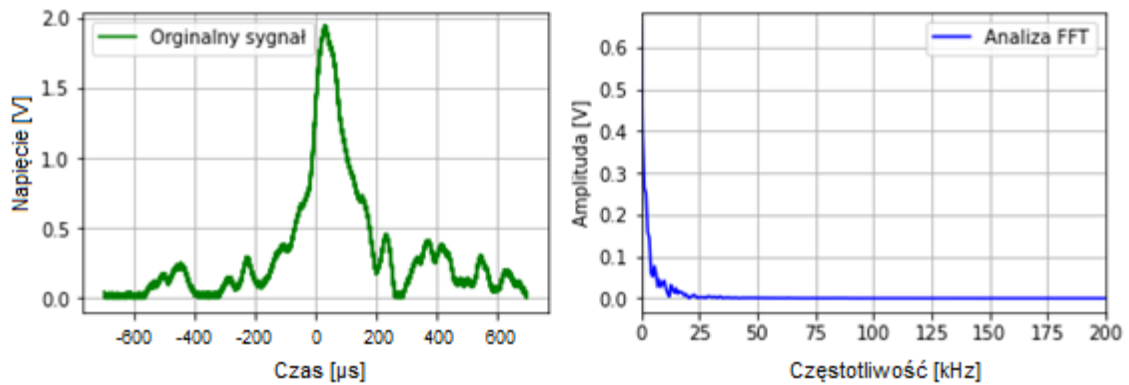
Rys. 16-1 Schemat układu detekcyjnego wykorzystujący wzmacniacz z przetwarzaniem



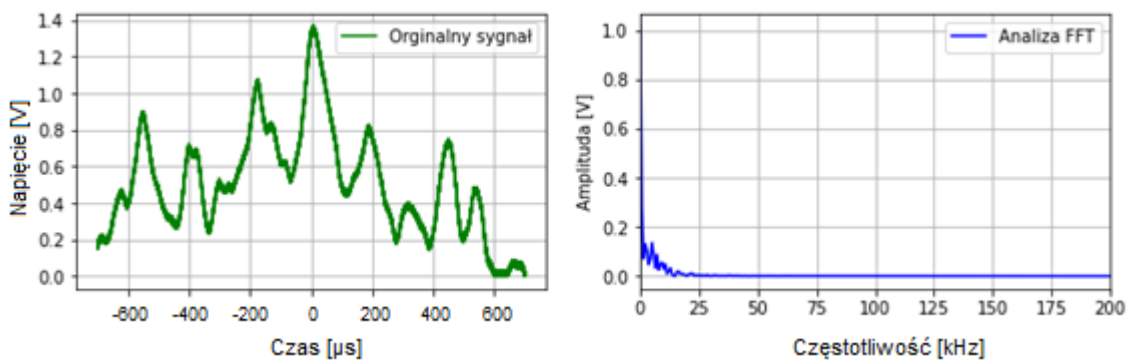
Rys. 16-2 Wykonana płytki PCB do detektora z przetwarzaniem

## 16.2 Analiza FFT sygnału z detektora z przetwarzaniem

Po prowadzeniu zmian ponownie przeprowadzono analizę FFT na sygnale wyjściowym z układu bez filtracji dla pojedynczego impulsu (Rys. 16-3) jak i grupy impulsów (Rys. 16-4)



Rys. 16-3 Analiza FFT pojedynczego impulsu z detektora z przetwarzaniem



Rys. 16-4 Analiza FFT grupy impulsów z detektora z przetwarzaniem

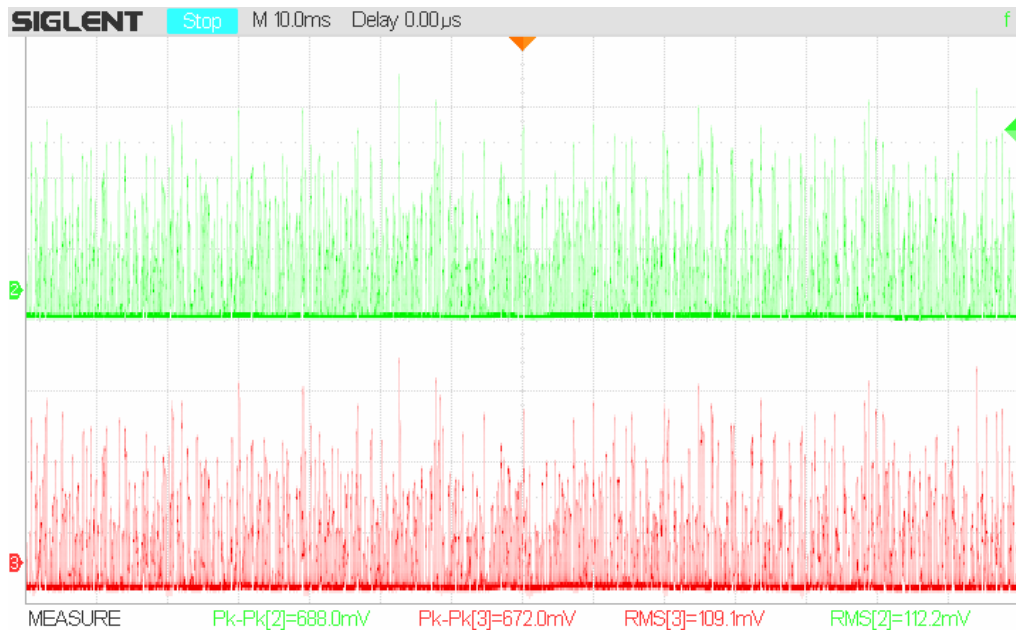
Analiza wykazała brak częstotliwości pasożytniczych w sygnale wyjściowym z detektora w porównaniu ze wcześniejszym rozwiązaniem (Rys. 15-13).

## 16.3 Pomiar szumów w układzie detektora z przetwarzaniem

Po modyfikacji konstrukcji detektora oraz analizie FFT przystąpiono do pomiarów mających na celu wyznaczenie poziomu szumu w detektorze z przetwarzaniem. Podobnie jak w detektorze bez przetwarzania analiza szumowa obejmowała pomiar średniej arytmetycznej wartości RMS szumu z 100 zebranych ramek przy pomocy oscyloskopu i zawężonym paśmie toru wejściowego do 20 MHz. Po zebraniu próbek w formacie csv

wyznaczono widmową gęstość mocy (PSD – *power spectral density*) w celu określenia wartości oraz charakteru szumu.

Na wyjściu detektora zastosowano wcześniej opracowany filtr Bessela 8 rzędu zaprojektowany na częstotliwość graniczną o wartości 16 kHz. Filtr Bessela nie wykazywał dużego tłumienia dla szumu (Rys. 16-5) ani nie powodował zniekształceń sygnału, ponieważ sygnał nie zawierał częstotliwości pasożytniczych.



Rys. 16-5 Redukcja szumów poprzez zastosowanie filtru Bessela 8 rzędu – napięcie w funkcji czasu (zielony – sygnał wejściowy, czerwony – sygnał wyjściowy)

Pomiary przeprowadzono w trzech wariantach co przedstawia Tab. 16-1.

Tab. 16-1 Plan pomiarów szumu w detektorze z przetwarzaniem

	Wentylator	Oświetlacz
I	Wyłączony	Wyłączony
II	Wyłączony	Włączony
III	Włączony	Włączony

Wartości widmowej gęstości mocy dla detektora z przetwarzaniem przedstawia Tab. 16-2.

Tab. 16-2 Wartości szumu w układzie detektora z przetwarzaniem przed filtrem

Przypadek według Tab. 16-1	Amplituda szumu [mV <sub>RMS</sub> ]	Gęstość mocy (PSD) [dB/Hz]
I	12,08	-155
II	122,1	-140
III	134,8	-110

Tab. 16-3 Wartości szumu w układzie detektora z przetwarzaniem za filtrem Bessela

Przypadek według Tab. 16-1	Amplituda szumu [mV <sub>RMS</sub> ]	Gęstość mocy PSD) [dB/Hz]
I	11,31	-160
II	121,3	-146
III	133,8	-100

Jak widać w Tab. 16-2 szum po włączeniu oświetlacza wzrósł do -140 dB. Przy włączonym zasilaniu układu, oświetlaczu oraz wentylatorze szum wzrósł do -110 dB, co w porównaniu z tabelą Tab. 15-3 wykazuje zniwelowanie działania wentylatora na działanie układu. Tab. 16-3 wykazuje minimalny wpływ analogowego filtra Bessela ósmego rzędu na poziom szumów w układzie ze wzmacniaczem z przetwarzaniem.

## 16.4 Analiza otrzymanych wyników

Tab. 16-4 Zestawienie wyników pomiarów dla detektora z przetwarzaniem

Nazwa filtru	Rząd filtru	Wielkość cząstek proszku						Ilość wykrytych impulsów
		<25µm	25-32µm	32-45µm	45-63µm	63-90µm	>90µm	
Brak filtru	-	24	57	38	8	3	1	153
Filtr Bessela	8	24	57	38	8	3	1	153

Zaimplementowany sprzętowo filtr analogowy Bessela ósmego rzędu (w układzie ze wzmacniaczem z przetwarzaniem) nie wpływa na ilość wykrytych impulsów ani na ilość wykrytych impulsów w żadnym z danych przedziałów wielkości cząstek.

Ze względu na redukcje szumów, docelową pracę w środowisku przemysłowym oraz wystarczającą ilość miejsca w urządzeniu, zdecydowano się na pozostawienie analogowego filtra Bessela ósmego rzędu.

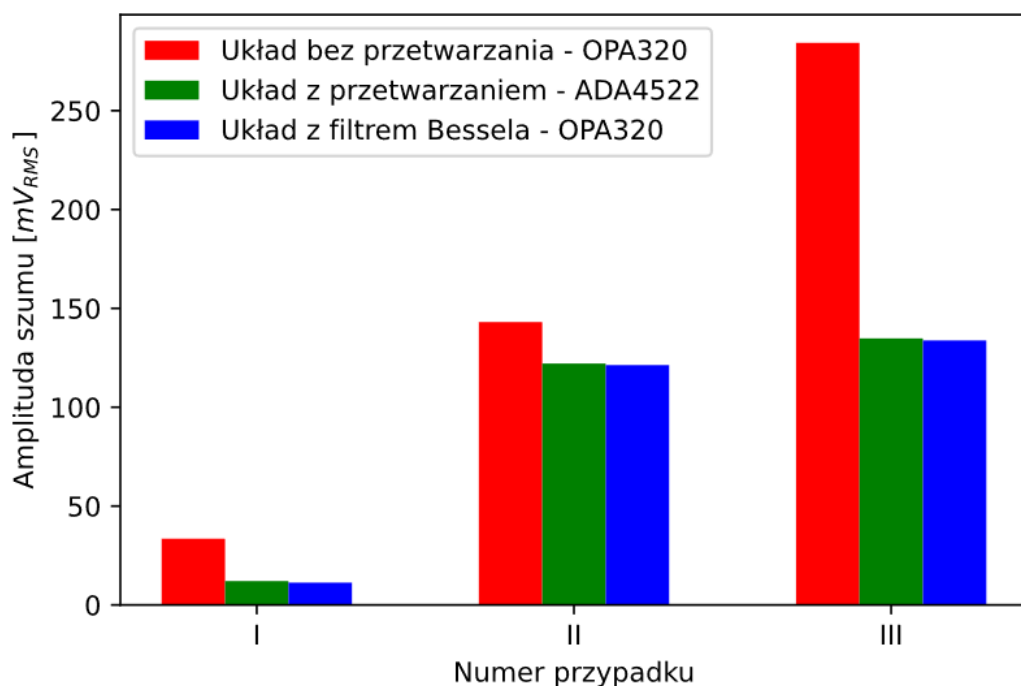
## 16.5 Porównanie otrzymanych wyników

Rys. 16-6 przedstawia porównanie maksymalnej amplitudy szumów dla układu z zastosowaniem wzmacniacza bez przetwarzania, wzmacniacza z przetwarzaniem oraz układu ze wzmacniaczem z przetwarzaniem wyposażonym w filtr Bessela 8 rzędu.

Jak widać na Rys. 16-7, na układ bez przetwarzania ma bardzo duży wpływ szum oświetlacza oraz praca wentylatora zasysającego proszek do komory pomiarowej.

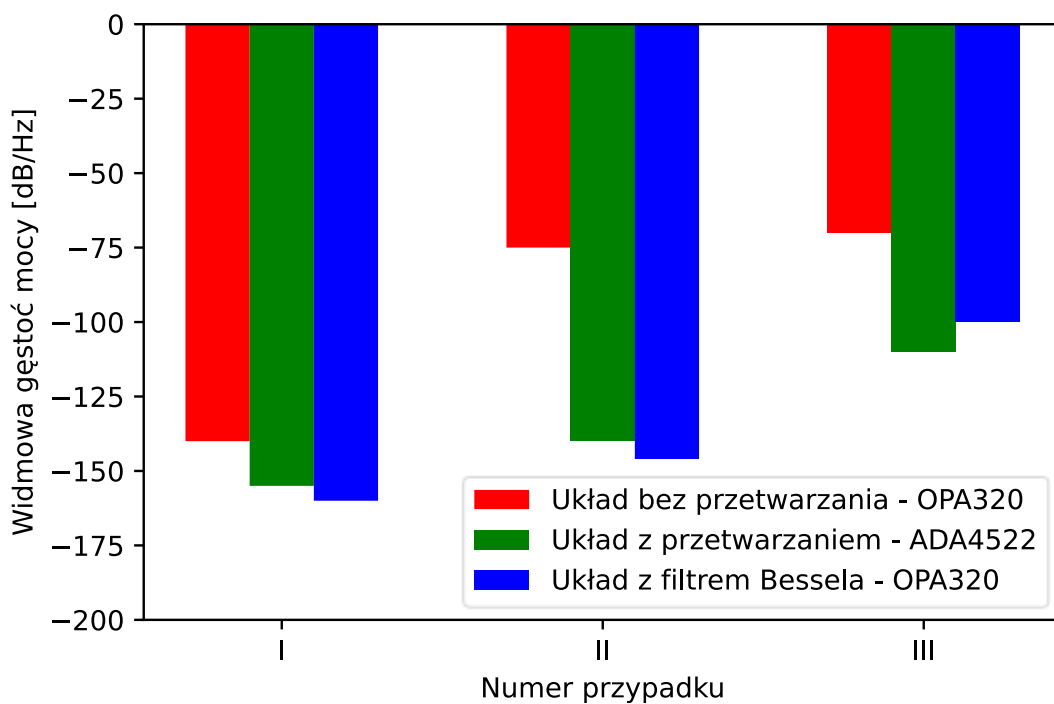
Filtr Bessela ósmego rzędu ma wpływ na wartość gęstości mocy szumów. Porównując rozwiązanie z zastosowaniem wzmacniacza bez przetwarzania oraz z przetwarzaniem zauważono dwukrotny spadek amplitudy szumów, co widać na Rys. 16-6.

Porównanie widmowej gęstości mocy według Tab. 16-1 przedstawia Rys. 16-7. Jak widać największy wzrost mocy szumów jest widoczny po włączeniu oświetlacza. Suma wykrytych impulsów przy zastosowaniu różnych metod filtracji (Rys. 16-8) nie jest znacząco inna, różnica między najmniejszą, a największą wartością wykrytych impulsów wynosi około 14 %.

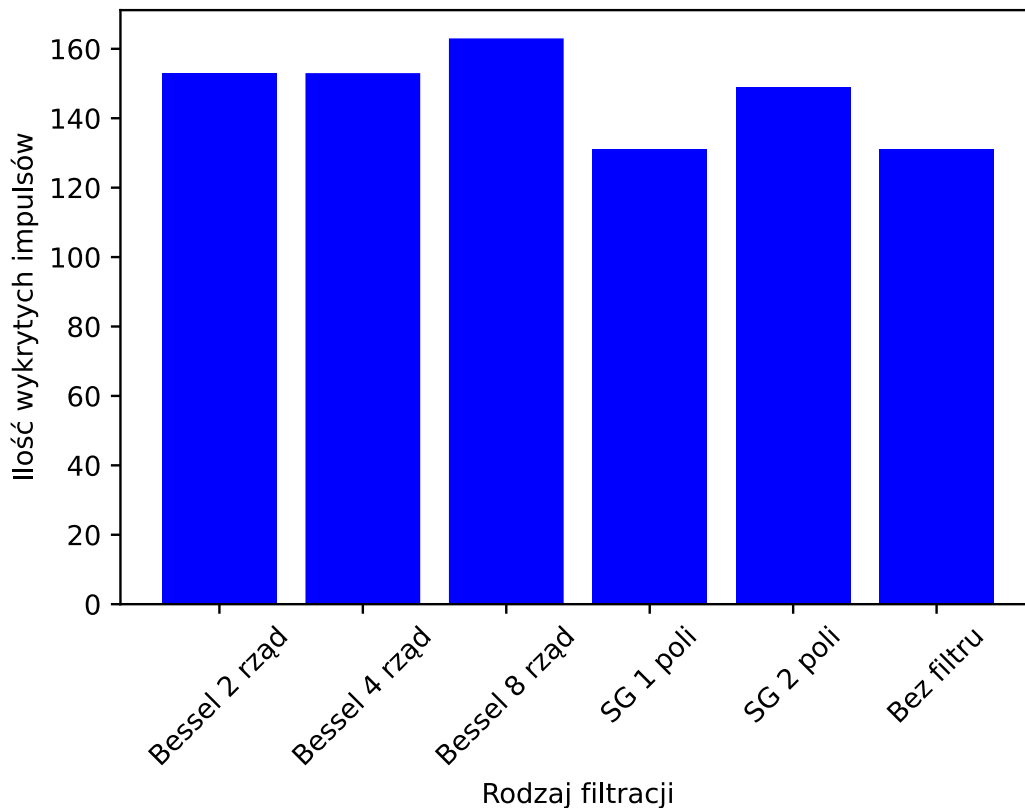


Rys. 16-6 Porównanie maksymalnej wartości amplitudy szumów według tabeli

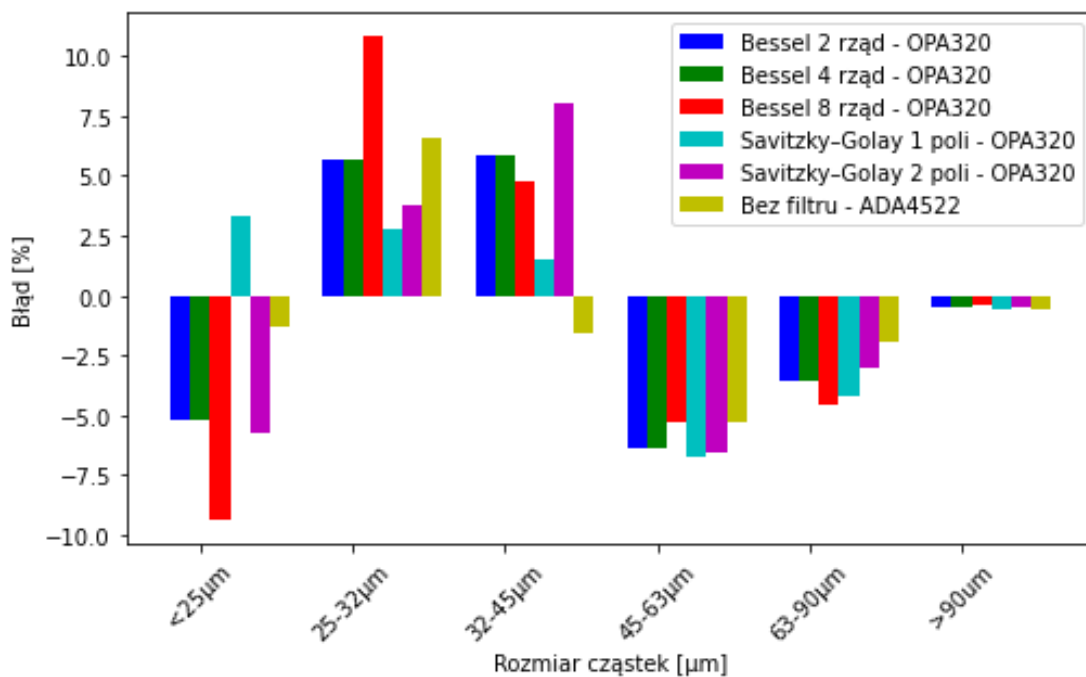




Rys. 16-7 Porównanie widmowej gęstości mocy dla trzech przypadków według



Rys. 16-8 Ilość wykrytych impulsów przy danym sposobie filtracji sygnału z detektora



Rys. 16-9 Zestawienie błędów między wartościami otrzymanymi z analizy sitowej oraz impulsami otrzymanymi na wyjściu układu z zastosowaniem różnych metod filtracji.

Końcowe zestawienie błędów między wartościami otrzymanymi z analizy sitowej oraz impulsami otrzymanymi na wyjściu układu przedstawia Rys. 16-9. Na wykresie uwzględniono przedział wielkości cząstek oraz sposób zastosowanej filtracji.

Wyniki przedstawione na Rys. 16-9 odnoszą się do układu, gdzie zastosowano wzmacniacz bez przetwarzania. Jedynie dane oznaczone jako „bez filtru” odnoszą się do układu zawierającego wzmacniacz z przetwarzaniem bez zastosowania filtru wyjściowego.

Filtry Bessela drugiego oraz czwartego rzędu w układzie bez przetwarzania w porównaniu z analiza sitową wykazują taki sam poziom błędu pomiarowego.

Analogowy Filtr Bessela ósmego rzędu w układzie bez przetwarzania wykazuje największy błąd pomiarowy we wszystkich przedziałach pomiarowych, w stosunku do innych rozwiązań.

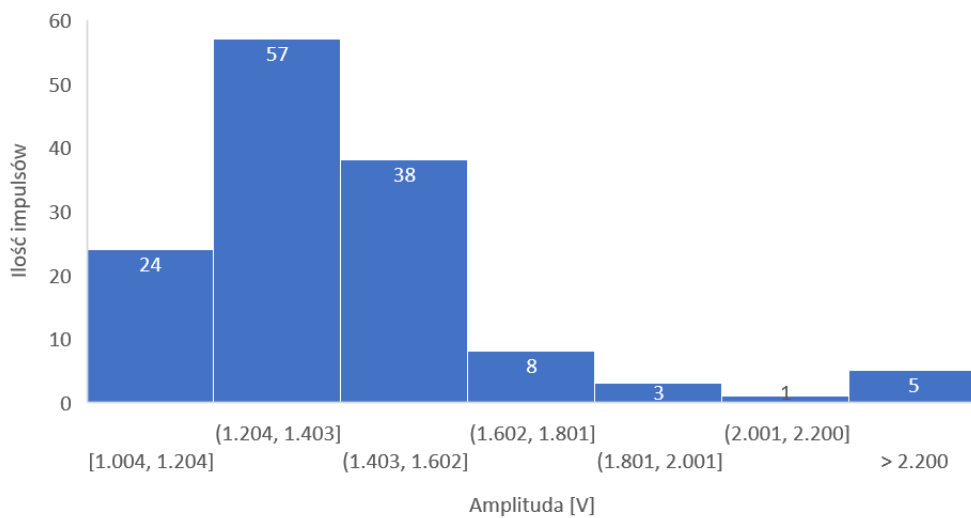
Cyfrowy algorytm filtracji Savitzky-Golay z zastosowanym wielomianem pierwszego stopnia wykazuje mały błąd pomiarowy; największy błąd przy filtrowaniu daną metodą otrzymano w zakresie 45 – 63 µm.

Cyfrowy algorytm filtracji Savitzky-Golay z zastosowanym wielomianem drugiego stopnia wykazuje większy błąd, niż w przypadku zastosowaniu wielomianu pierwszego stopnia oraz filtru Bessela drugiego oraz czwartego rzędu.

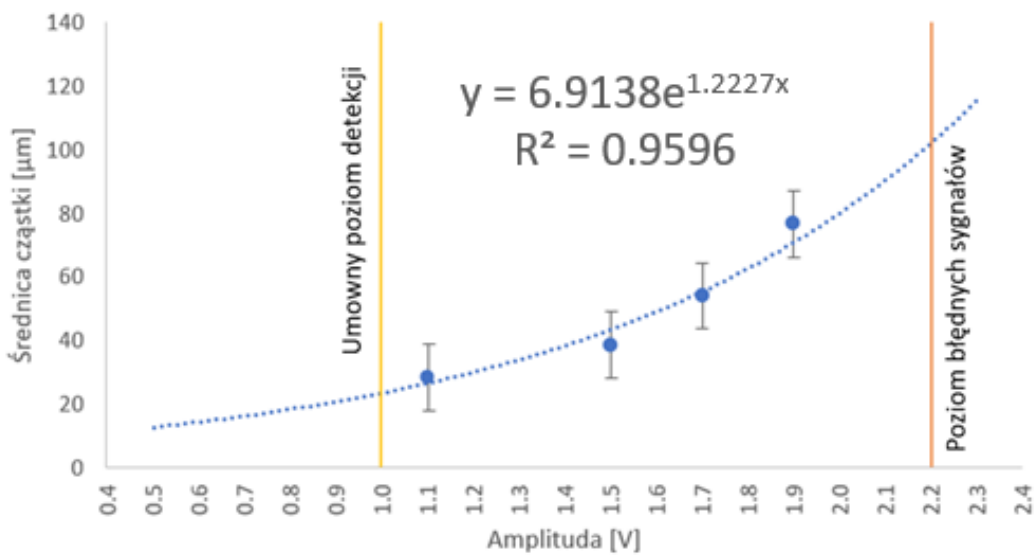
Układ z przetwarzaniem bez filtra posiada najmniejsze błędy pomiarowe. Jedynie w przedziale 25 – 35  $\mu\text{m}$  wartość błędu jest większa niż w przypadku filtra cyfrowego Savitzky-Golay z wielomianem pierwszego i drugiego stopnia.

## 16.6 Wyznaczenie stężenia masowego zapylenia

Na podstawie analizy sitowej oraz amplitudy impulsów Rys. 16-10 otrzymanych z detektora określono zależność między wielkością cząstek i amplitudą impulsów wyjściowych z detektora  $d(V_0)$ . Jak widać na Rys. 16-11 zależność nie jest liniowa.



Rys. 16-10 Histogram impulsów z układu wykorzystującego wzmacniacz z przetwarzaniem



Rys. 16-11 Zależność między średnicą cząstki i amplitudą napięcia wyjściowego po zastosowaniu rozwiązania wykorzystującego wzmacniacz z przetwarzaniem

Po wyznaczeniu funkcji  $d(V_o)$  Rys. 16-11 określono równanie opisujące stężenie masowe na podstawie średnicy ziaren odniesionych do kuli.

Odniesienie to było możliwe, ponieważ proces atomizacji zapewnia kształt sferoidalny cząstek proszku [7]. Opracowane równanie ( 16-1 ) przedstawiające stężenie masowe odniesione do ilości cząstek oraz ich średnicy.

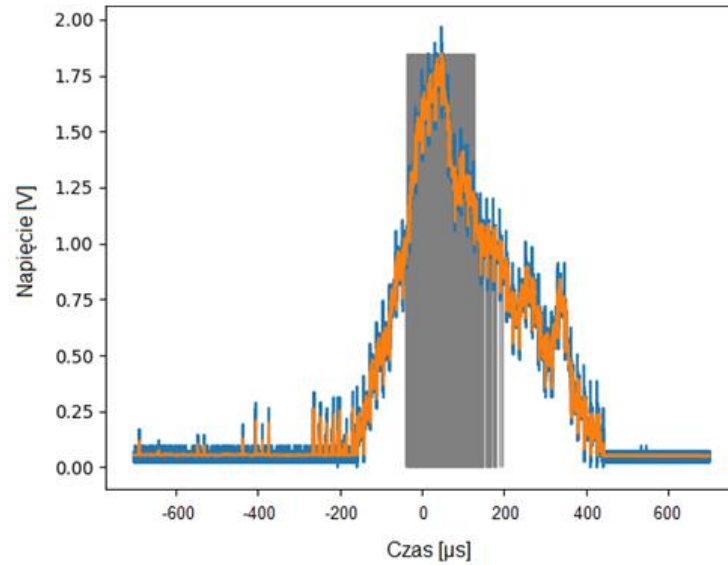
$$p_n = \sum_{k=0}^n \left( \frac{\frac{4}{3}\pi * \left(\frac{d(V_o)}{2}\right)^3 * \rho * 10^{-9}}{V} \right) \quad (16-1)$$

Gdzie:  $p_n$  - stężenie masowe [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ],  $d(V_o)$  - zależność między amplitudą napięcia wyjściowego i średnicą cząstek,  $\rho$  - gęstość materiału [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $V$  - objętość zassanego powietrza [ $\text{m}^3$ ]

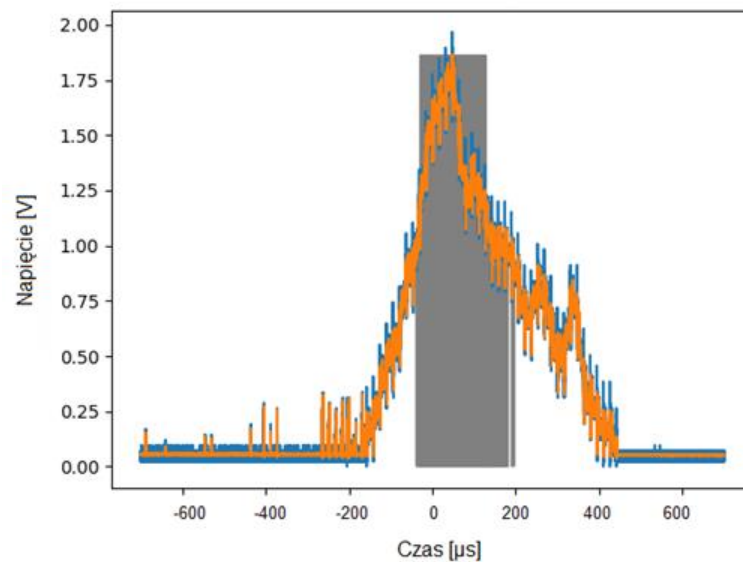
Opracowane równanie wraz z odpowiednimi współczynnikami zostało zaimplementowane w oprogramowaniu systemu wbudowanego. W oprogramowaniu został uwzględniony umowny poziom detekcji oraz poziom błędnych sygnałów.

## 16.7 Detekcja i eliminacja błędów pomiarowych

Głównym problemem wynikających z szumów powstałych w układzie są problemy związane ze zmianą progu detekcji oraz fałszywymi wyzwoleniami komparatora [160]. Jak pokazano na Rys. 16-12 oraz Rys. 16-13 zwiększanie wartości histerezy zmniejsza ilość fałszywych wyzwoleń.



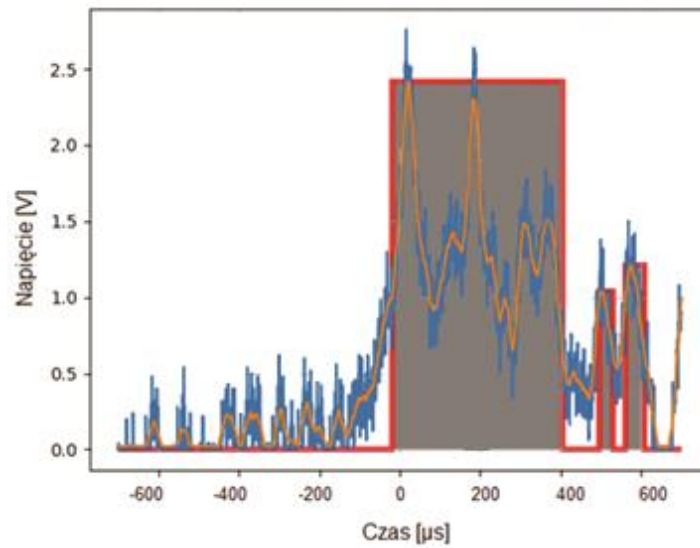
Rys. 16-12 Impuls z detektora wraz z szumem (filtracja Savitzky-Golay, drugi stopień wielomianu, histereza 3 mV)



Rys. 16-13 Impuls z detektora wraz z szumem (filtracja Savitzky-Golay, drugi stopień wielomianu, histereza 30 mV)

Na Rys. 16-12, Rys. 16-13 oraz Rys. 16-14 szare pole obrazuje zakres działania komparatora, kolor niebieski reprezentuje sygnał wejściowy, a sygnał pomarańczowy to sygnał poddany działaniu filtru. Rysunki reprezentują symulację działania komparatora na rzeczywistym sygnale wyjściowym z detektora. Jak widać na rysunkach zwiększenie wartości histerezy przy stałym poziomie szumu pozwala na zmniejszenie fałszywych wyzwoleń komparatora.

Drugim zagadnieniem, które stanowi istotny problem jest wykrywanie kilku impulsów z których rejestrowany jeden o najwyższej amplitudzie (Rys. 16-14).



Rys. 16-14 Przykładowa błędna detekcja serii impulsów

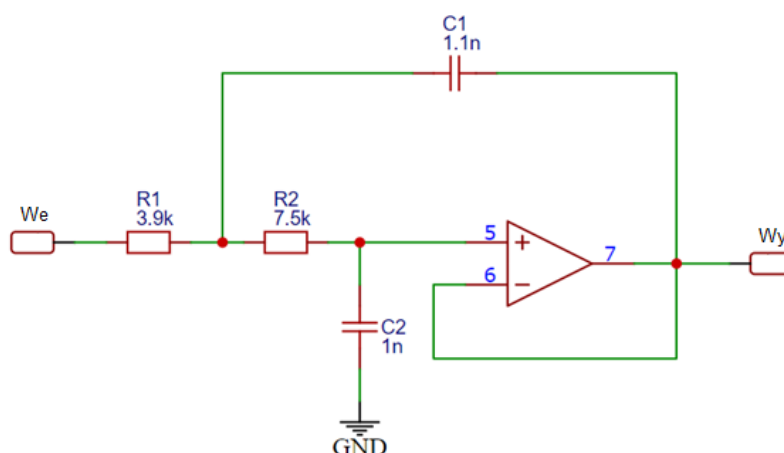
Rozwiązaniem tego problemu jest pomiar czasu trwania szerokości impulsu. Dzięki znanym parametrom układu kształtującego impulsy oraz określeniu zakresu pomiarowego można ustalić maksymalną szerokość impulsu pozwalającego na odrzucenie pomiaru po przekroczeniu określonego limitu czasu; zaznaczono kolorem czerwonym na Rys. 16-14 w przedziale od 0 do 400 μs.

## 17. Końcowa implementacja rozwiązania

Wszystkie działania związane z badaniami oraz synteza cyfrową filtrów w języku Python miały na celu dobór odpowiednich metod filtracji i rozwiązań sprzętowych możliwych do implementacji sprzętowej rozwiązania.

### 17.1 Implementacja sprzętowa filtru Bessela 8 rzędu

Po analizie szumów w układzie zdecydowano się na skonstruowanie filtru dolnoprzepustowego Bessela 8 rzędu w topologii Sallen-Key (Rys. 17-1), ze względu na pracę w środowisku przemysłowym docelowego urządzenia. Wysoki rząd filtru pozwolił na wzrost współczynnika tłumienia szumów [112,161].

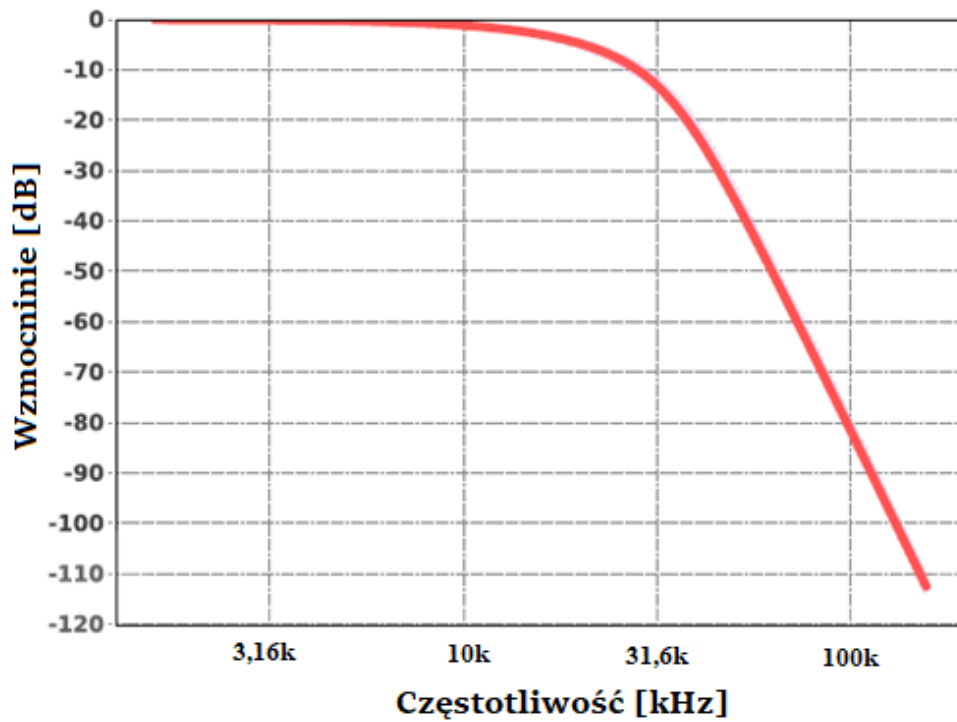


Rys. 17-1 Jeden stopień filtru dolnoprzepustowego w topologii Sallen-Key

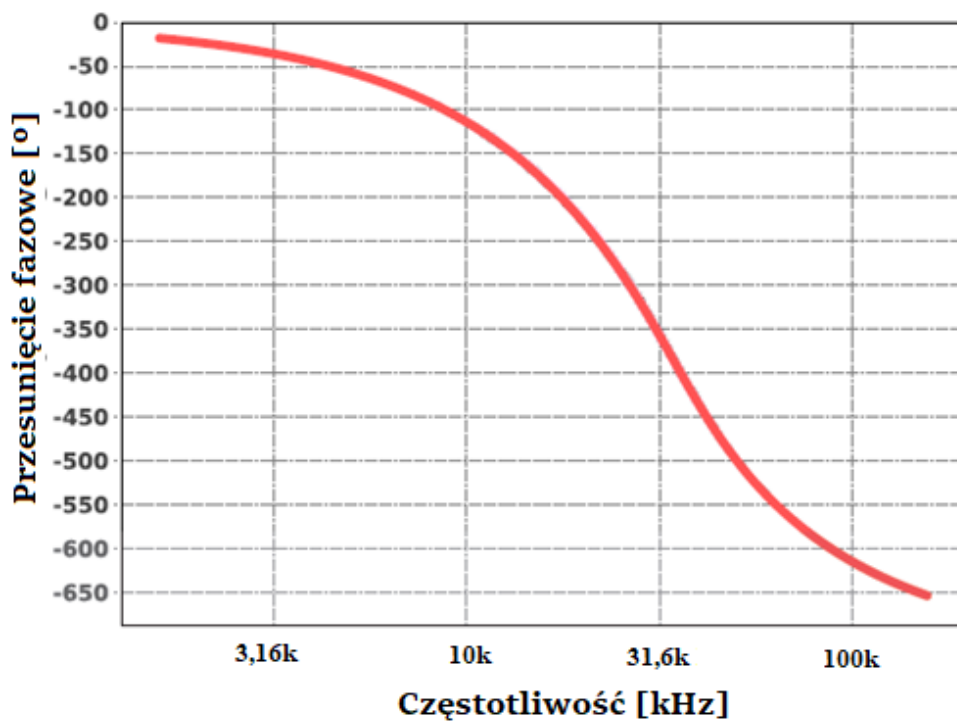
Jako częstotliwość graniczną dla filtru przyjęto 16 kHz. Rezystory oraz kondensatory zostały wybrane z szeregu E24 o tolerancji 5%. Różowym kolorem na wykresach oznaczono zakres tolerancji dla układu z elementami o tolerancji 5%. Zaprojektowany układ posiada 4 sekcje pozwalające osiągnąć stromość charakterystyki filtru wynoszącej 160dB/dek (48dB/okt.) [162].

Filtr zaprojektowano przy pomocy narzędzia webowego *Filter design tool* [163] udostępnianego przez firmę Texas Instruments. Narzędzie umożliwiło wykreślenie charakterystyki amplitudowej (Rys. 17-2), fazowej (Rys. 17-3), opóźnienia grupowego (Rys.

17-4) oraz odpowiedzi jednostkowej (Rys. 17-5). Pierwszą sekcję filtra w topologii Sal-  
len-Key przedstawia Rys. 17-1.

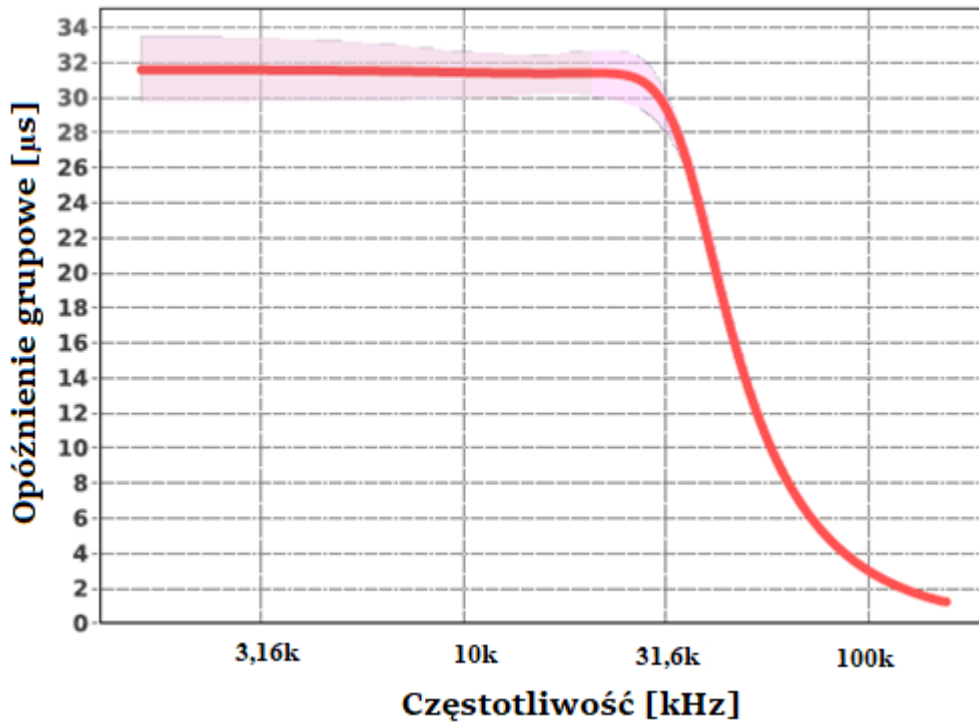


Rys. 17-2 Charakterystyka amplitudowa zaprojektowanego filtra

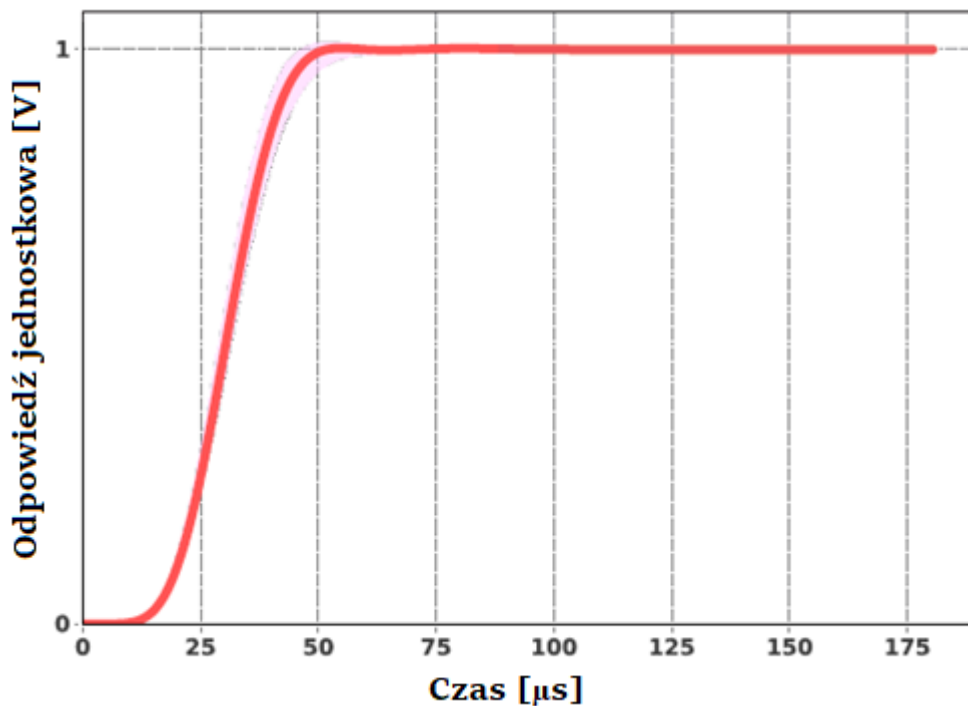


Rys. 17-3 Charakterystyka fazowa zaprojektowanego filtra





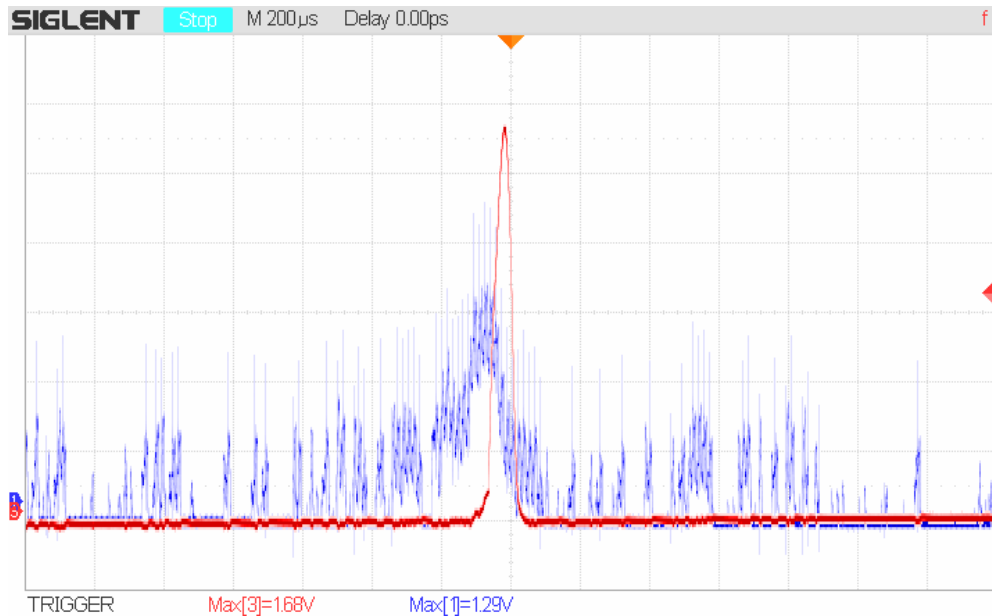
Rys. 17-4 Opóźnienie grupowe zaprojektowanego filtra



Rys. 17-5 Odpowiedź jednostkowa zaprojektowanego filtra

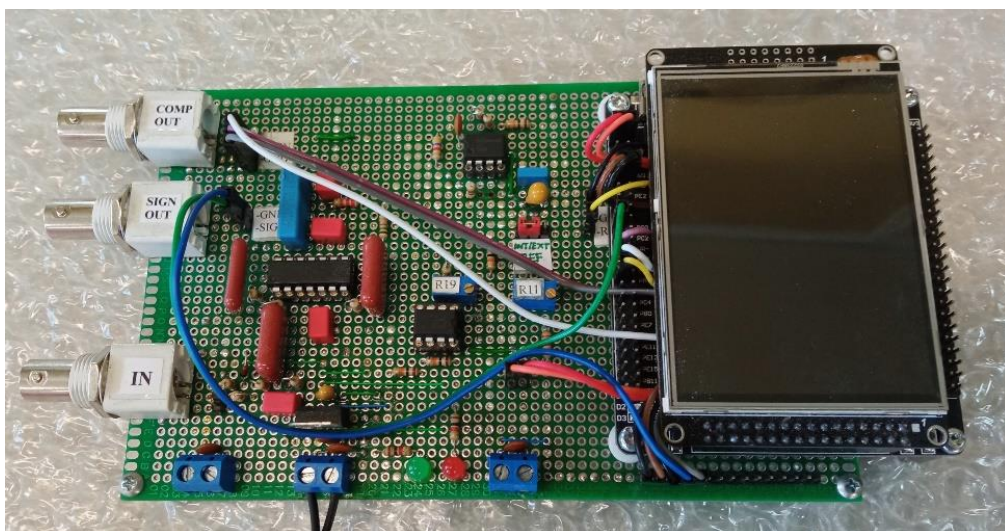
Zastosowany filtr Bessela posiada wyjątkowo płaską charakterystykę fazową kosztem najmniejszej stromości charakterystyki amplitudowej, w której nie występują zafalowania. Stałe opóźnienie grupowe w zakresie pasma przenoszenia wpływa na bardzo

małe zniekształcenia impulsów [112]. Działanie filtra na sygnale z detektora bez przetwarzania przedstawia Rys. 17-6.



Rys. 17-6 Filtracja sygnału pochodzącego z detektora bez przetwarzania filtrem Bessela 8 rzędu – napięcie w funkcji czasu (niebieski - sygnał wejściowy, czerwony - sygnał wyjściowy)

W układzie filtra zmieniono układ TL084 na układ OP848 (Rys. 17-7) z powodu dużo lepszej charakterystyki fazowej wzmacniacza, co zniwelowało konieczność dodawania dodatkowego inwertera fazy oraz poprawiło dynamikę układu w zakresie napięcia wyjściowego. Zmiana wzmacniacza pozwoliła dostosować napięcie wyjściowe do zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego.

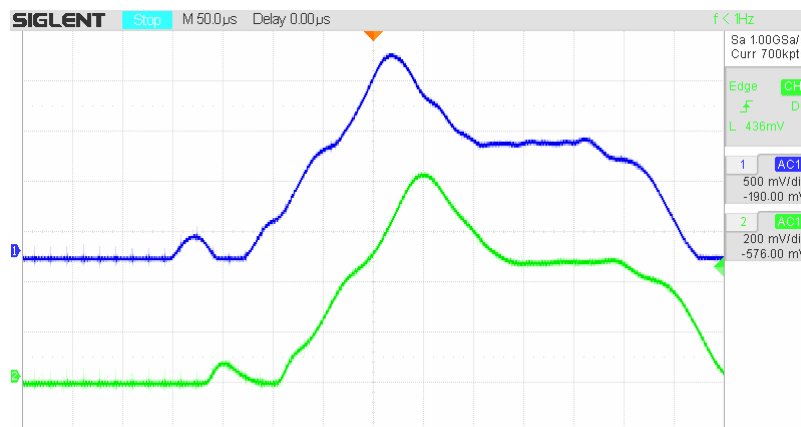


Rys. 17-7 Prototyp filtra dolnoprzepustowego oraz części cyfrowej układu

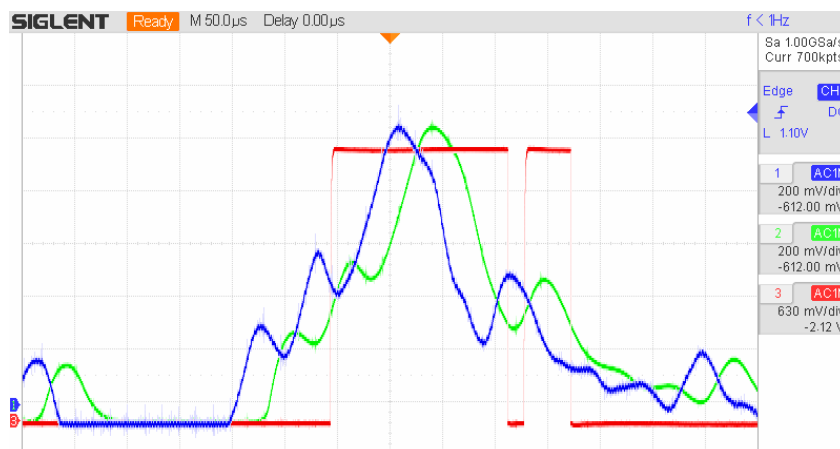
## 17.2 Sprzętowa detekcja impulsów

Ostatecznie zdecydowano się na implementację rozwiązania z przetwarzaniem na układzie ADA4522 oraz zastosowanie filtra Bessela 8 rzędu w celu filtracji sygnału ze względu na docelową pracę urządzenia w środowisku przemysłowym i wysokie wzmocnienia w torze wejściowym układu. Jako komparator zastosowano układ LM393. Działanie filtra w warunkach normalnej pracy nieznacznie wpływało na sygnał wyjściowy co przedstawiono na Rys. 17-8. Sygnał z komparatora jest wykorzystywany do detekcji impulsów na wyjściu filtra oraz sprawdzania poprawności pomiaru (algorytm korekcji błędów).

W platformie testowej do pomiaru amplitudy napięcia wyjściowego zastosowano mikrokontroler STM F4 posiadający 12-bitowy przetwornik z sukcesywną aproksymacją (SAR). Do detekcji impulsów wykorzystano komparator z ustalonym progiem wyzwalania co pokazuje na Rys. 17-9.



Rys. 17-8 Działanie filtra Bessela na sygnał wyjściowy podczas normalnej pracy, kolor niebieski wejście sygnału, kolor zielony – wyjście filtra.



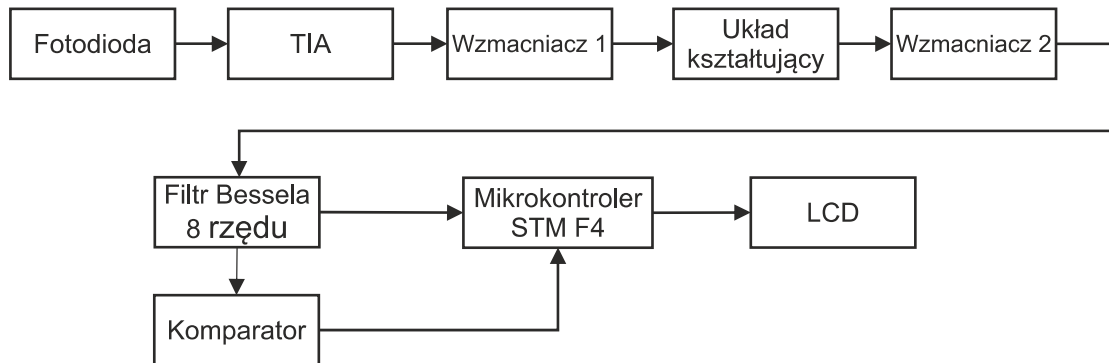
Rys. 17-9 Działanie detektora ( kolor niebieski – wejście filtra, kolor zielony – wyjście filtra, kolor czerwony – sygnał z komparatora)

### 17.3 Topologia zastosowanego rozwiązania

Schemat blokowy układu elektronicznego przedstawia Rys. 17-10. Główną częścią układu jest część analogowa (*front end*), dostarczająca sygnał do przetwornika analogowo-cyfrowego zawartego w strukturze mikrokontrolera przez filtr Bessela 8 rzędu.

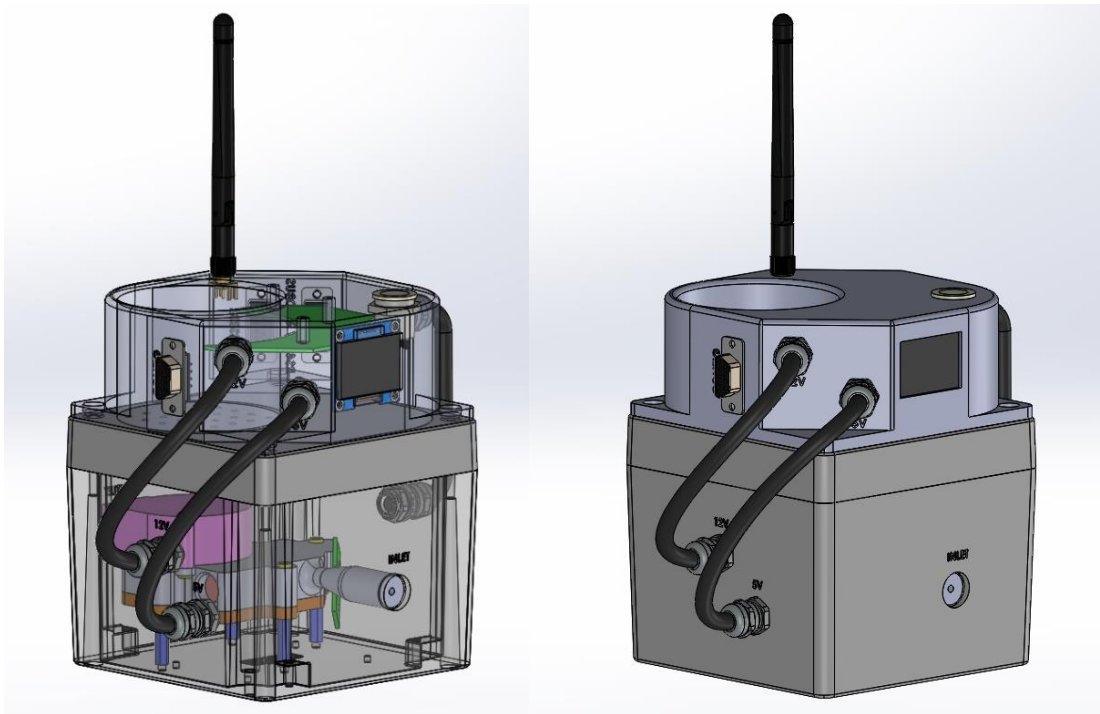
Mikrokontroler ustala próg wyzwalania dla komparatora ustalając wartość napięcia referencyjnego. Sygnał zbocza narastającego oraz opadającego, które jest doprowadzone bezpośrednio do mikrokontrolera określa moment rozpoczęcia oraz zakończenia pomiaru największej wartości amplitudy impulsu wejściowego.

Wynik pomiaru zapisywany jest w pamięci mikrokontrolera, a następnie przetwarzany na wartość stężenia wagowego. Obliczone stężenie wagowe jest wyświetlane na wyświetlaczu.

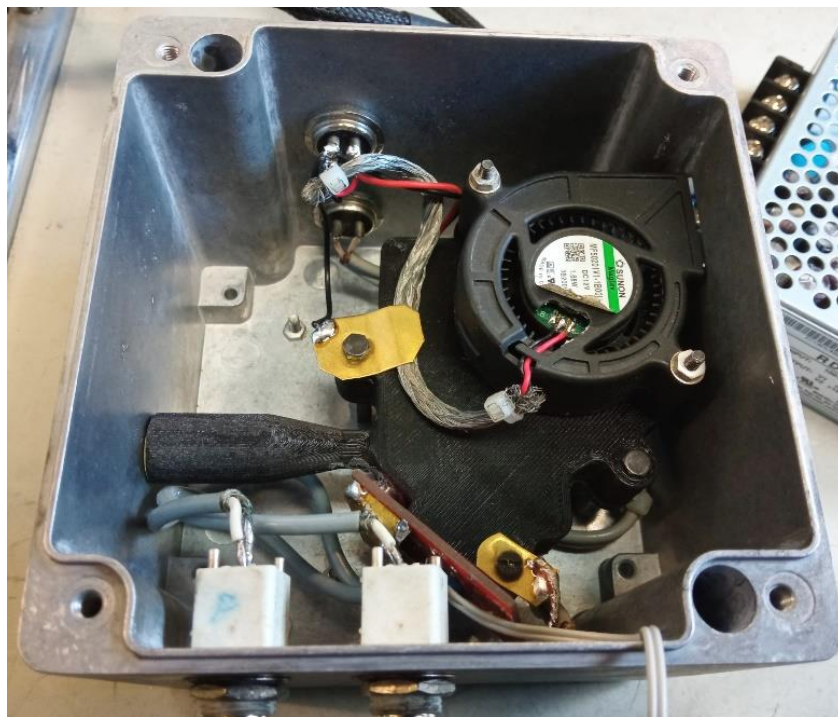


Rys. 17-10 Schemat blokowy układu elektronicznego

Jako końcowy efekt powstało urządzenie prototypowe posiadające wszystkie założone funkcjonalności. Model 3D CAD przedstawia Rys. 17-11, a Rys. 17-12 część wykonanego urządzenia.



Rys. 17-11 Model CAD urządzenia do ciągłego zapylenia przy procesach łoża proszkowego

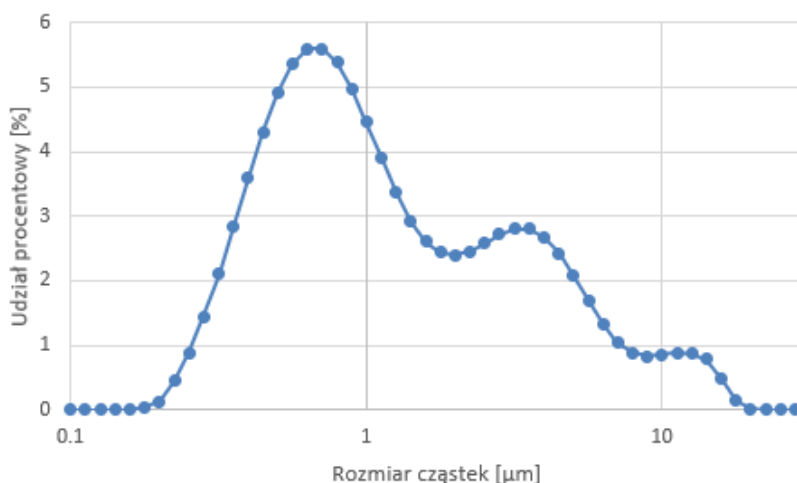


Rys. 17-12 Elementy wykonanego wyrządzenia do ciągłego pomiaru zapylenia  
(komora pomiarowa oraz układ detektora)

## 17.4 Odpowiedź układu na submikronowe niesferyczne proszki

W związku z walidacją rozwiązania oraz wadami analizy sitowej, która nie pozwala na dokładną segregację najmniejszych cząstek proszku, stanowiących największe zagrożenie postanowiono sprawdzić detekcję submikronowych cząstek na proszku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Przeprowadzono analizę uziarnienia proszku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  przy pomocy sedymetatora laserowego Mastersizer 3000E w roztworze wodnym, używając przystawki Hydro 2000MU (A) w celu poznania rozmiaru cząstek, co przedstawia Rys. 17-13.



Rys. 17-13 Analiza proszku uziarnienia proszku  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
(metoda analizy - sedymetator laserowy)



Rys. 17-14 Odpowiedź układu na cząstkę proszku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – napięcie w funkcji czasu

Działanie sensora potwierdzono na submikronowych cząstkach używając proszku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Rys. 17-14) co potwierdza działanie sensora w szerokim zakresie rozmiarów cząstek, pomimo wyznaczonego poziomu detekcji (Rys. 16-11).

## 18. Wnioski końcowe

W rozprawie przedstawiono zastosowane rozwiązania, które zazwyczaj były ostatnimi iteracjami danego rozwiązania, prezentując pozytywny wynik lub najlepszą wersję danego rozwiązania. W rezultacie doprowadziły one do powstania dedykowanego sensora zapylenia przeznaczonego do procesów łoża proszkowego, a w szczególności do procesu SLS/SLM.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań stanowią zdaniem autora, istotną nowość i dostarczają wielu cennych informacji w projektowaniu dedykowanych rozwiązań w obszarze pomiaru zapylenia przy procesach łoża proszkowego, gdzie wykorzystywane są sferoidalne proszki o dużej gęstości.

Po analizie zagadnienia można wyróżnić kilka najważniejszych wniosków:

1. Opracowany czujnik pozwala na detekcję cząstek z przedziału od 1 do 80  $\mu\text{m}$ .
2. Maksymalny bezwzględny błąd pomiarowy w odniesieniu do referencyjnej metody wagowej w całym zakresie pomiarowym nie przekracza 7%.
3. Spektralna gęstość mocy szumów w układzie z przetwarzaniem spadała o 40 dB w stosunku do układu bez przetwarzania.
4. Amplituda szumów na wyjściu w układzie z przetwarzaniem spadała o 50 % w stosunku do układu bez przetwarzania.
5. Zastosowanie wzmacniacza z przetwarzaniem znacznie zredukowało błąd pomiarowy w zakresie najmniejszych cząstek.
6. Stopień wejściowy detektora powinien być zoptymalizowany pod kątem pracy stałoprądowej oraz szumów termicznych w układzie wzmacniacza TIA.
7. Odpowiedź układu pomiarowego nie jest liniowa, ponieważ stosunek powierzchni projekcyjnej cząsteczki nie jest liniowo zależny od średnicy.
8. Kluczowe dla konstrukcji detektora jest określenie poziomu szumu oraz poziomu detekcji sygnału wejściowego.
9. W celu redukcji błędów konieczne jest ustalenie poziomu błędnych sygnałów.



10. Badany materiał stali MS1 ma kształt sferoidalny oraz nie zawiera tlenków które mogły by wpływać na masę cząstek.
11. Równanie Naviera-Stokesa nie jest odpowiednie do wyznaczania prędkości opadania cząstek pyłu w powietrzu ze względu na swoje uproszczone założenia.
12. Wybrany filtr Bessela nie jest zoptymalizowany amplitudowo, ale zapewnia najmniejsze zniekształcenia impulsów o kształcie zbliżonym do rozkładu normalnego (impulsów zbliżonych do gaussowskich).
13. Filtr Bessela drugiego oraz czwartego rzędu w układzie bez przetwarzania, w porównaniu z analiza sitową wykazują taki sam poziom błędu pomiarowego.
14. Wartość amplitudy napięcia wyjściowego jest zależna od koloru cząstek na wejściu detektora.
15. Detektor jest w stanie wykrywać cząstki poniżej 1  $\mu\text{m}$  lecz jest to zależne od barwy wykrywanych cząstek.
16. Po skalibrowaniu do danego materiału sensor może zostać użyty do współpracy z sferoidalnymi cząstkami o mniejszych gęstościach stosowanych w procesach łoża proszkowego.

Część rozwiązań przedstawionych w pracy doktorskiej zostało poddane ochronie patentowej poprzez trzy zgłoszenia [147,164,165] w czym jedno na czas składania pracy doktorskiej uzyskało status patentu (Pat.241411) [166].

## Literatura

1. Kondej, D.; Gawęda, E. *Pomiary stężeń metali we frakcjach pyłów emitowanych w procesach obróbki materiałów metalowych*; 2010;
2. Kolb, T.; Beisser, R.; Schmidt, P.; Tremel, J.; Schmidt, M. Safety in additive manufacturing: Fine dust measurements for a process chain in Laser beam melting of metals. *RTEjournal - Forum für Rapid Technol.* **2017**, *14*, 1–22.
3. PN-ISO 4225:1999 - Jakość powietrza - Zagadnienia ogólne - Terminologia 1999, 15.
4. Regulation of the Minister of Family, Labor and Social Policy regarding the highest permissible concentrations and intensities of harmful factors in the work environment 2018, 40.
5. European Parliament and of the Council Directive 2004/107/EC - relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air 2004.
6. Narayanan, R.G. *Powder metallurgy – basics & applications*; 2019;
7. Hajnys, J.; Pagac, M.; Mesicek, J.; Petru, J.; Spalek, F. Research of 316L Metallic Powder for Use in SLM 3D Printing. *Adv. Mater. Sci.* **2020**, *20*, 5–15, doi:10.2478/adms-2020-0001.
8. Yang, L.; Wang, L.; Chen, Y. Solid-state shear milling method to prepare PA12/boron nitride thermal conductive composite powders and their selective laser sintering 3D-printing. *J. Appl. Polym. Sci.* **2020**, *137*, 1–13, doi:10.1002/app.48766.
9. Technologies, M. F2792 – 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2013, 2–4.
10. TSI Incorporated Assessing 3D Printer Emissions in the Breathing Zone. **2017**, *010*, 8–11.
11. Azimi, P.; Zhao, D.; Pouzet, C.; Crain, N.E.; Stephens, B. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50*, 1260–1268, doi:10.1021/acs.est.5b04983.

12. Floyd, E.L.; Wang, J.; Regens, J.L. Fume emissions from a low-cost 3-D printer with various filaments. *J. Occup. Environ. Hyg.* **2017**, *14*, 523–533, doi:10.1080/15459624.2017.1302587.
13. Zhang, Q.; Wong, J.P.S.; Davis, A.Y.; Black, M.S.; Weber, R.J. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers. *Aerosol Sci. Technol.* **2017**, *51*, 1275–1286, doi:10.1080/02786826.2017.1342029.
14. Zhang, Q.; Sharma, G.; Wong, J.P.S.; Davis, A.Y.; Black, M.S.; Biswas, P.; Weber, R.J. Investigating particle emissions and aerosol dynamics from a consumer fused deposition modeling 3D printer with a lognormal moment aerosol model. *Aerosol Sci. Technol.* **2018**, *52*, 1099–1111, doi:10.1080/02786826.2018.1464115.
15. UL Chemical Safety ANSI / CAN / UL 2904 : Standard Method for Testing and Assessing Particle and Chemical Emissions from 3D Printers.
16. Bernatikova, S.; Dudacek, A.; Prichystalova, R.; Klecka, V.; Kocurkova, L. Characterization of ultrafine particles and VOCs emitted from a 3D printer. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 1–15, doi:10.3390/ijerph18030929.
17. Gwiazda, P. 3dpbm zapowiada wzrost wartości rynku druku 3D z kompozytów do 10,6 mld USD Dostępne na: <https://centrumdruku3d.pl/3dpbm-zapowiada-wzrost-wartosci-rynku-druku-3d-z-kompozytow-do-106-mld-usd/>.
18. Wohlers Associates *The 2021 Wohlers Report*; 2022; ISBN 978-0-9913332-7-1.
19. Hubs Additive manufacturing trend report 2021. **2021**, 1–16.
20. Instrument, T. *PM 2.5 /PM 10 Particle Sensor Analog Front-End for Air Quality Monitoring Design*; 2016;
21. Texas Instruments *Optical Front-End System Reference Design*; 2015;
22. Wells, S.; Hunt, S. Optical Liquid Analysis Prototyping Platform Lights the Pathway to Ubiquitous Sensing. *Analog Dialogue* **2022**, *56*, 1–5.
23. PN-EN 4225:1999 – Jakość powietrza – Zagadnienia ogólne – Terminologia 1999, 15.
24. Instytut chemii Uniwersytet w Białymstoku Instrukcja do ćwiczeń Dostępne na: [https://chemia.biol-chem.uwb.edu.pl/media/uploads/2017/02/17/instrukcje\\_chemia-i-ochrona-atmosfery.pdf](https://chemia.biol-chem.uwb.edu.pl/media/uploads/2017/02/17/instrukcje_chemia-i-ochrona-atmosfery.pdf).
25. PN-EN 12341:2014-07 - Powietrze atmosferyczne - Standardowa grawimetryczna

- metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego 2014, 55.
26. PN-EN 12341:2006 - Jakość powietrza - Oznaczanie frakcji PM 10 pyłu zawieszonego - Norma wycofana i zastąpiona przez PN-EN 12341:2014-07 2006, 23.
  27. Juda-Rezler, K.; Toczko, B. *Pyły drobne w atmosferze - Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce*; 2016; ISBN 9788361227731.
  28. Badanie własności proszków - AGH - Katedra Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków. W; 2002; ss. 10–25.
  29. PN-EN ISO 4497:2020-11 - Proszki metaliczne - Oznaczanie wielkości cząstek przez przesiewanie na sucho 2020, 18.
  30. Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska - AGH Dostępne na: <http://www.kseiuos.agh.edu.pl>.
  31. Baron, P.; Willeke, K. *Aerosol Measurement Principles, Techniques, and Applications*; 2. wyd.; Wiley Interscience, 2001; ISBN 0471356360.
  32. Paridah, M.; Moradbak, A.; Mohamed, A.; Owolabi, F. abdulwahab taiwo; Asniza, M.; Abdul Khalid, S.H.. Methods for online monitoring of air pollution concentration. *Intech* **2016**, i, 13, doi:<http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
  33. Johannsmann, D. *The Quartz Crystal Microbalance in Soft Matter Research Fundamentals and Modeling*; 2016;
  34. Test Therm - katalog Dostępne na: <https://www.test-therm.pl/katalog-produktow/>.
  35. Zsigmondy, R.; Bachmann, W. Handhabung des Immersion Ultra Mikroskops. **1914**, 14, 18–30.
  36. Uniwersytetu w Granadzie ultramikroskop Dostępne na: <https://atalaya3d.ugr.es/obra/microscopio-de-zsimondi>.
  37. Bielecki, Z.; Rogalski, A. *Detekcja sygnałów optycznych*; 2. wyd.; Wydawnictwo Naukowe PWN, 2021;
  38. Agranovski, I. *Aerosols: Science and Technology - 1st Edition*; 2010; ISBN 352732660X.
  39. Arago, F. Oeuvres. *Paris* **1858**, 7, 10.
  40. Govi, G. C. R. Acad. Sci. *Paris* **1860**, 51, 360, 699.
  41. Tyndall, J. On the blue colour of the sky, the polarization of skylight, and on the

- polarization of light by cloudy matter generally. *Philos. Mag.* **1869**, 37, 384.
42. Mie, G. A contribution to the optics of turbid media. *Ann. Phys. (N. Y.)* **1908**, 25, 377–445.
  43. van de Hulst, H.C. *Light Scattering by Small Particles*; John Wiley: New York, 1957;
  44. Kerker, M. et al. Color effects in the scattering of white light by micron and submicron spheres. *J. Opt. Soc. Am.* **1966**, 56, 1248–1258.
  45. Kerker, M. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*; Academic Press: New York, 1969;
  46. Smoluchowski, M. Molekular-kinetische Theorie der Opaleszenz von Gasen in kritischen Zustände, sowie einiger Verwendter Erscheinungen. *Ann. Phys. (N. Y.)* **1908**, 25, 205.
  47. Cabannes, J. Sur la diffusion de la lumiere par l'air. *C. R. Acad. Sci* **1915**, 62, 160.
  48. Strutt, R. The light scattering by gases, its polarization and intensity. *Proc. R. Soc.* **1918**, 94, 453.
  49. Wood, R. Light scattering by air and the blue colour of the sky. *Philos. Mag.* **1920**, 39, 423.
  50. Hutchins, D.K. Characterization of particles by modulated dynamic light scattering. 1989.
  51. Peters, W. Instrument for determining static and/or dynamic light scattering 2000.
  52. Udo, K.; Braumann, W. Method and device for identifying a photoluminescent material 2013.
  53. Yamaguchi, T. Particle size distribution measuring apparatus and method 2006.
  54. Ohkubo, K. Light Scattering Detector 2007.
  55. Jayaratne, R.; Liu, X.; Ahn, K.H.; Asumadu-Sakyi, A.; Fisher, G.; Gao, J.; Mabon, A.; Mazaheri, M.; Mullins, B.; Nyaku, M.; i in. Low-cost PM2.5 sensors: An assessment of their suitability for various applications. *Aerosol Air Qual. Res.* **2020**, 20, 520–532, doi:10.4209/aaqr.2018.10.0390.
  56. Krawczykowski, D. Zastosowanie dyfrakcyjnej analizy laserowej do kontroli uziarnienia produktów przeróbki rud metali. *Inż. Miner.* **2017**, 2017, 233–240.
  57. Sensirion *SPS30 data sheet - Dust sensor module*; 2018;
  58. Canu, M.; Galvis, B.; Morales, R.; Ramírez, O.; Madelin, M. Understanding the Shinyei PPD24NS low-cost dust sensor. *2018 IEEE Int. Conf. Environ. Eng. EE*

- 2018 - *Proc.* **2018**, 1–10, doi:10.1109/EE1.2018.8385268.
59. ISO 13320:2020 Particle size analysis — Laser diffraction methods 2020, 59.
  60. Stanisław, K.; Instruments, K. Porównanie metod pomiarowych. *KAMIKA Instruments Publ.* **2014**, 3, 1–9.
  61. Vander Wal, R.L.; Zhou, Z.; Choi, M.Y. Laser-induced incandescence calibration via gravimetric sampling. *Combust. Flame* **1996**, 105, 462–470, doi:10.1016/0010-2180(95)00216-2.
  62. Inova Fitness Co., L. SDS198 - Laser PM100 Sensor specification. **2015**.
  63. Nova Fitness Co., L. Laser PM2.5 Sensor specification Product model: SDS011 Version: V1.3. **2015**, 1–11.
  64. Alfano, B.; Barretta, L.; Giudice, A. Del; De Vito, S.; Francia, G. Di; Esposito, E.; Formisano, F.; Massera, E.; Miglietta, M.L.; Polichetti, T. A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. *Sensors (Switzerland)* **2020**, 20, 1–56, doi:10.3390/s20236819.
  65. Tian, R.; Paulos, E. MyPart : Personal , Portable , Accurate Airborne Particle Counting 2016, 1338–1348.
  66. Koniecznyński, J. Właściwości pyłu respirabilnego emitowanego z wybranych instalacji. *Work. Stud. Pr. I Stud.* **2010**, 79, 1–150.
  67. European Parliament and of the Council Directive 2008/50/EC - on ambient air quality and cleaner air for Europe 2008.
  68. Sensor community - Luft Daten Dostępne na: <https://sensor.community/>.
  69. Airly Dostępne na: <https://airly.org/>.
  70. NodeMCU Github Dostępne na: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
  71. Sensor community - Luft Daten - zdjęcie sensora Dostępne na: <https://medium.com/@ignazw/air-quality-measurements-fcc32d59dca7>.
  72. Plantower *PMS5003 - Dust sensor module*; 2016;
  73. Tian, R.; Dierk, C.; Myers, C.; Paulos, E. MyPart. **2016**, 1338–1348, doi:10.1145/2858036.2858571.
  74. Kokhanovsky, A. *Aerosol Optics Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere*; Springer, 2008;
  75. Lidar stacjonarny do pomiaru zapylenia Dostępne na: <https://www.acoem.com/en/products/dust-blast-monitoring/real-time-dust->

- monitors/lidar/.
76. Srama, R. Cassini-Huygens and Beyond—Tools for Dust Astronomy. *Habilit. treatise Univ. Stuttgart* **2009**.
  77. Khalisi, E.; Srama, R.; Grün, E. Counter data of the Cosmic Dust Analyzer aboard the Cassini spacecraft and possible „dust clouds” at Saturn. *Adv. Sp. Res.* **2015**, *55*, 303–310, doi:10.1016/j.asr.2014.09.002.
  78. NOAA Dust from Western Sahara’s Sandy Shores Dostępne na: <https://www.nesdis.noaa.gov/news/todays-satellite-image-dust-western-saharas-sandy-shores>.
  79. EC Working Group Guide to the demonstration of equivalence - Report by an EC Working. **2010**.
  80. Charvet, A. *Aerosol Filtration*; Iste Press - Elsevier, 2016;
  81. Śłosorz, Z.; Radwan, K.; Rakowska, J. Problemy oceny wielkości i kształtu ziaren materiałów sypkich. *Bezpieczeństwo i Tech. Pożarnicza / Saf. Fire Tech.* **2012**, 59–64.
  82. Janas, S. Oznaczenie pyłu całkowitego i respirabilnego. *Radwag* 2010, 13.
  83. Gmbh, H.H. Respicon 2 TM For the simultaneous measurement 2004, 49.
  84. Li, J. Recent advances in low-cost particulate matter sensor: calibration and application. *Eng. Appl. Sci. Theses Diss.* **2019**, 382.
  85. Pedersini, F. Improving a Commodity Dust Sensor to Enable Particle Size Analysis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2019**, *68*, 177–188, doi:10.1109/TIM.2018.2834178.
  86. Stwora, A. Optymalizacja procesu wytwarzania metodami przyrostowymi SLS/SLM ze względu na wybrane właściwości fizyczne wykonywanych elementów, 2019.
  87. Manufactur3d 7 Methods of Manufacturing Metal 3D Printing Powder Dostępne na: <https://manufactur3dmag.com/7-methods-manufacturing-metal-3d-printing-powder/>.
  88. Dunkley, J.J. *Advances in powder and powder metallurgy - Properties, Processing and Applications*; Chang, I., Zhao, Y., Red.; Woodhead Publishing, 2013; ISBN 9780857094209.
  89. Redwood, B.; Schöffner, F.; Garret, B. *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications*; 3D Hubs, 2017;

90. HP Etui do teflonu MJF Dostępne na: <https://www.drukarki3dhp.pl/modele/hp-jet-fusion-3d-500-300-color/>.
91. Voxeljet Forma oraz rdzenie wytworzone na urządzeniu firmy Voxeljet Dostępne na: <https://research.csiro.au/metals/add-manufacturing/aus-innovation/voxeljet-sand-3d-printer/>.
92. ExOne *Tungsten-Bronze*; 2019;
93. ProJet CJP 660Pro Dostępne na: <http://3dsystemspolska.pl/produkty/drukarki-3d-kolorowe/30/projet-cjp-660pro>.
94. Treatstock Element wytworzony na urządzeniu ProJet 4500 Dostępne na: <https://www.treatstock.com/machines/3d-printers/technology-cjp>.
95. Z Corp Forma gipsowa wykonana w technologii CJP Dostępne na: [https://www.arttopart.com/z\\_corporation.htm](https://www.arttopart.com/z_corporation.htm).
96. Freemelt The 3D printer tailored for materials research and development 2021, 4.
97. CSIRO Elementy wykonane w technologii EBM Dostępne na: <https://research.csiro.au/metals/add-manufacturing/aus-innovation/arcam-electron-beam-metal-3d-printer/>.
98. Formlabs Schemat procesu SLS Dostępne na: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>.
99. Materialise Rama drona wykonana w technologii SLM Dostępne na: <https://www.materialise.com/pl>.
100. Yule, A.; Dunkley, J. *Atomization of Melts: for Powder Production and Spray Deposition*; Oxford University Press, 1994;
101. 3d printekzo Dodatkowe zewnętrzne filtry Dostępne na: <https://www.3dprintekzo.be/products-services/3d-printers/slm-hl280/>.
102. ULT AG Umwelt-Lufttechnik Dostępne na: <https://www.ult.de/>.
103. AMP+ Dostępne na: <https://ampplus.de/en/home/>.
104. ICD Klasyfikacja filtrów i pochłaniaczy Dostępne na: <https://www.icd.pl/poradnik/post/klasyfikacja-filtrow-i-pochlaniaczy>.
105. 3M VERSAFLO TR-315E+ Dostępne na: <https://www.icd.pl/zestaw-startowy-3m-versaflo-tr-315-e.html>.
106. Evolution Pracownik wyposażony w maskę pełnotwarzową Dostępne na: <https://evolution.skf.com/the-added-value-of-3d-printing/>.
107. Kaye, B.H. *Characterization of Powders and Aerosols*; Wiley-VCH, 1999; ISBN



- 3-527-28853-8.
108. Amphenol *SM-PWM-01A - Dust sensor module*; 2014;
  109. Kolwas, K. Rozpraszanie światła na pojedynczej cząstce. W *Badania aerozolu miejskiego*; 2007; ss. 28–46.
  110. Korbel, K. *Elektronika Jądrowa cz 2 układy elektronik jądrowej wyd. drugie zmienione*; Wydawnictwo AGH, 1985;
  111. Korbel, K. *Szum sygnał filtracja w jądrowej spektrometrii amplitudowo - czasowej*; Wydawnictwo AGH, 2011;
  112. Górecki, P. *Wzmacniacze operacyjne*; BTC, 2004;
  113. Jaworska, M. Szumy własne układów elektronicznych Dostępne na: <https://elektronikab2b.pl/technika/25143-szumy-wlasne-ukladow-elektronicznych>.
  114. Nilsson, B.O. Noise Mechanisms in Laser Diodes. *IEEE Trans. Electron Devices* **1994**, *41*, 2139–2150, doi:10.1109/16.333834.
  115. Semleit, D.; Trampe, A.; Fissan, H. Fluctuations and noise of the optical output power of laser diodes and the effect on optical particle size determination. *Aerosol Sci. Technol.* **1997**, *26*, 356–367, doi:10.1080/02786829708965436.
  116. Krieger, J. *The noise of avalanche breakdown*; 2017;
  117. KKP Od czego zależą szumy rezystora? Dostępne na: <https://elektronikab2b.pl/technika/16650-od-czego-zaleza-szumy-rezystora>.
  118. KOA Speer Electronics RS73 2020, 23–25.
  119. KOA Speer Electronics RN73R 2020, 27–29.
  120. Ardizzoni, J. Rarely Asked Questions. *Analog Devices Rarely Asked Quest.* 1.
  121. Murata Manufacturing Why does acoustic noise occur in ceramic capacitors, and does this have any effect on reliability? Dostępne na: <https://www.murata.com/en-sg/support/faqs/capacitor/ceramiccapacitor/char/0020>.
  122. Paul, A. *The Kirkendall Effect in Solid State Diffusion PhD Thesis Laboratory of Materials and Interface Chemistry*; 2004; ISBN 9038626460.
  123. Green, T. *Analog Engineer's Pocket Reference*; 2016; ISBN 9788578110796.
  124. Korbel, K. *Elektronika jądrowa - Część II*; Grotowski, K., Red.; II.; AGH, 1985;
  125. Texas Instruments *OPAx350 High-Speed, Single-Supply, Rail-to-Rail Operational Amplifiers*; 1999;
  126. Analog Devices *ADA4522 - Rail-To-Rail Output Operational Amplifiers*; 2013;

127. University, W. Multichannel analyzer.
128. Multichannel analyzer Dostępne na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Multichannel\\_analyzer](https://en.wikipedia.org/wiki/Multichannel_analyzer).
129. Abernethy, J.D.W. The boxcar detector. A synchronous detector which is used to recover waveforms buried in noise. *Wirel. World* **1970**, 1–5.
130. Zurich Instruments *Principles of Boxcar Averaging*; 2021;
131. Detection, P. What is a Lock-in Amplifier? TECHNICAL NOTE. *Measurement* 1–4.
132. Fimpel, P.; Riek, C.; Ebner, L.; Leitenstorfer, A.; Brida, D.; Zumbusch, A. Boxcar detection for high-frequency modulation in stimulated Raman scattering microscopy. *Appl. Phys. Lett.* **2018**, *112*, doi:10.1063/1.5022266.
133. Marcin, B. *Filtry Elektryczne - Laboratorium Elektroniki, Wydział Fizyki PW*; 2013;
134. Zumbahlen, H. *Linear Circuit Design Handbook*; Analog Devices, 2008; ISBN 9781119130536.
135. Steiglitz, K. The equivalence of digital and analog signal processing. *Inf. Control* **1965**, *8*, 455–467, doi:10.1016/S0019-9958(65)90374-8.
136. Schafer, R.W. What is a savitzky-golay filter? *IEEE Signal Process. Mag.* **2011**, *28*, 111–117, doi:10.1109/MSP.2011.941097.
137. Savitzky, A.; Golay, M.L.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.* **1964**, *36*, 1639–1643, doi:10.1021/ac60214a048.
138. Puzdrowska, P. Metoda filtrowania sygnału szybkozmiennej temperatury spalin wylotowych silnika o zs. **2008**, *13*, 1–10.
139. Brahme, A. *Comprehensive biomedical physics*; Elsevier, 2014; ISBN 9780444536327.
140. Huang, H.; Hu, S.; Sun, Y. A discrete curvature estimation based low-distortion adaptive savitzky–golay filter for ECG denoising. *Sensors (Switzerland)* **2019**, *19*, 1–18, doi:10.3390/s19071617.
141. Schmid, M.; Rath, D.; Diebold, U. Why and How Savitzky–Golay Filters Should Be Replaced. *ACS Meas. Sci. Au* **2022**, *2*, 185–196, doi:10.1021/acsmesuresciau.1c00054.
142. Kulka, Z.; Libura, A.; Nadachowski, M. *Przetworniki analogowo-cyfrowe i*

- cyfrowo-analogowe*; WKŁ, 1987;
143. EOS GmbH - Electro Optical Systems *Material data sheet EOS MaragingSteel MSI*; 2011;
  144. Kamoka - Ref.No F207001 Dostępne na: <https://superparts.pl/filtr-powietrza-filtron-ar327-2-c11120-mercedes-benz-klasa-a-vaneo/8696> -.
  145. Grafana Dostępne na: <https://grafana.com/>.
  146. Datasheet, E. ESP8266EX Datasheet. *Espr. Syst.* **2020**, 31.
  147. Karcz, S.; Skarabalak, G.; Machynia, Z. P.435647 - Urządzenie do ciągłego pomiaru jakości powietrza oraz stopnia zapylenia 2021.
  148. EuSpray *General catalogue*; 2020;
  149. Kay, A. *Operational Amplifier Noise - Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise*; Elsevier Inc., 2012;
  150. Information, O. *Bpx65 Photodiode Specsheet*; 2018;
  151. Graeme, J. *Photodiode amplifiers op amp solutions*; McGraw Hill, 1996;
  152. Python Dostępne na: <https://www.python.org/>.
  153. Romano, F. *Lerning Python*; 2015; ISBN 9781783551712.
  154. SciPy Dostępne na: <https://scipy.org/>.
  155. Geeksforgeeks.org Plot the power spectral density using Matplotlib – Python Dostępne na: <https://www.geeksforgeeks.org/plot-the-power-spectral-density-using-matplotlib-python/>.
  156. Welch, P.D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra. *IEEE Trans. audio Electroacoust.* **1967**, 70–73.
  157. Brain-wiki contributors Nieparametryczne widmo mocy Dostępne na: [http://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php?title=Nieparametryczne\\_widmo\\_mocy&oldid=5999](http://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php?title=Nieparametryczne_widmo_mocy&oldid=5999).
  158. matplotlib.org PSD demo Dostępne na: [https://matplotlib.org/stable/gallery/lines\\_bars\\_and\\_markers/psd\\_demo.html](https://matplotlib.org/stable/gallery/lines_bars_and_markers/psd_demo.html).
  159. Funfer, E. *Liczniki promieniowania*; Wydawnictwo Naukowe PWN, 1960;
  160. Moghimi, R. Curing Comparator Instability with Hysteresis. **2000**, 7, 4–6.
  161. Texas Instruments Inc. Noise 2 - precision lab TIPL 1312 Dostępne na: <https://training.ti.com/system/files/docs/1312 - Noise 2 - slides.pdf>.
  162. Klasche, G.; Hofer, R. *Układy elektroniki profesjonalnej*; WKŁ, 1985;
  163. Canonsburg, T.D.; Suite, A.E. Filter Design Tool Dostępne na:

<https://webench.ti.com/filter-design-tool/>.

164. Karcz, S.; Skarabalak, G. P. 435045 - Energooszczędne urządzenie do pomiaru stopnia zapylenia powietrza 2020.
165. Karcz, S.; Skarabalak, G.; Machynia, Z.; Putyra, P.; Podsiadło, M. P.439724 - Stanowisko do testowania i kalibracji czujników zapylenia oraz sposób testowania i kalibracji czujników zapylenia 2021.
166. Karcz, S.; Skarabalak, G.; Machynia, Z. Szczegóły patentu - P.435647 Dostępne na: <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.402588>.