Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł: „Zastosowanie mikro elektro-mechanicznych układów sensorycznych (MEMS) do określenia oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na struktury mechaniczne”

mgr inż. Kamil Kurpanik

Dyscyplina: **Inżynieria Mechaniczna**

PROMOTOR: dr hab. inż. Sławomir Kciuk, prof. PŚ

PROMOTOR POMOCNICZY: dr inż. Edyta Krzystała

Gliwice 2026

PODZIĘKOWANIA

Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi, profesorowi Sławomirowi Kciukowi oraz promotor pomocniczej doktor Edycie Krzystale za opiekę naukową, cenne wskazówki, konstruktywne uwagi i wsparcie, które towarzyszyły mi podczas realizacji niniejszej rozprawy.

Dziękuję również wszystkim, którzy na przestrzeni tych lat wspierali mnie w mojej drodze naukowej - pomagali, doradzali, dzielili się wiedzą i doświadczeniem oraz niejednokrotnie służyli cenną podpowiedzią. Wasza życzliwość, wsparcie i gotowość do pomocy miały ogromne znaczenie dla realizacji niniejszej pracy oraz mojego rozwoju naukowego.

Prace dedykuję mojej żonie, Darii, oraz moim dzieciom, Matyldzi, Grzesiowi i Czarusiowi

z całego serca dziękuję za bezwarunkową miłość, cierpliwość, wyrozumiałość i nieustające wsparcie, które towarzyszyły mi podczas tego niezwykle intensywnego i szalonego okresu, jakim był początek mojej kariery naukowej.

Dziękuję, że byliście ze mną w chwilach zwątpienia, zmęczenia i niekończącej się pracy, a także wtedy, gdy kolejne cele wydawały się odległe. Bez Waszego wsparcia, cierpliwości i wiary we mnie droga ta byłaby zdecydowanie trudniejsza.

Spis treści

Spis treści

Wstęp ... 8
1. Miejsce problemu w literaturze ... 9
2. Teza, cel i zakres pracy ... 21
3. Projekt i walidacja systemu akwizycji danych ... 23
3.1 System akwizycji danych ... 27
Komunikacja SPI ... 32
Testy systemu pomiarowego ... 38
Test systemu pomiarowego z użyciem wahadła ... 41
4. Badania eksperymentalne i numeryczne oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu ... 50
4.1 Badania eksperymentalne ... 50
Stanowisko do badań ... 50
Badania terenowe – seria I ... 53
Badania terenowe – seria II ... 56
Stanowisko badawcze ... 56
Wyniki ... 58
4.2 Badania numeryczne ... 60
Model materiałowy ... 60
Model 3D ... 61
Dyskretyzacja ... 62
Warunki brzegowe ... 63
Obciążenie ... 64
Wyniki symulacji ... 64
4.3 Analiza wyników symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych ... 66
5. Modelowanie czujnika MEMS ... 69
5.1 Modelowanie zjawisk mechanicznych ... 70
5.2 Identyfikacja struktury czujnika MEMS ... 72
Analiza strukturalna ... 73
5.3 Modelowanie zjawisk elektrycznych ... 83
Analiza własności materiałowych ... 88

5.4 Matematyczny model zjawisk elektromechanicznych 92
6. Model numeryczny czujnika MEMS 94
Model numeryczny części mechanicznej 94
Model numeryczny części elektrycznej 97
Model numeryczny elektromechaniczny 99
Wnioski 102
Podsumowanie 104
Bibliografia 106
Streszczenie rozprawy w języku polskim 113
Streszczenie rozprawy w języku angielskim 114

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ε - przenikalność elektryczna ośrodka [F/m]

ε_0 - przenikalność elektryczna próżni [F/m]

ε_r - względna przenikalność elektryczna ośrodka [–]

ε - odkształcenie względne [mm/mm]

a - przyspieszenie [m/s²]

b - współczynnik tłumienia [N·s/m]

b_x, b_γ, b_z - współczynniki tłumienia w poszczególnych kierunkach [N·s/m]

C_v - współczynnik zmienności [%]

f - częstotliwość [Hz]

F - siła [N]

g - przyspieszenie ziemskie [9,81 m/s²]

k - współczynnik sztywności [N/m]

k_x, k_γ, k_z - współczynniki sztywności w poszczególnych kierunkach [N/m]

m - masa sejsmiczna [kg]

n - liczba pomiarów [–]

p - ciśnienie [Pa]

t - czas [s]

u_x, u_γ, u_z - przemieszczenia podstawy czujnika w poszczególnych kierunkach [m]

x, y, z - współrzędne / kierunki pomiarowe [–]

x_x, x_γ, x_z - przemieszczenia masy sejsmicznej w poszczególnych kierunkach [m]

$\bar{x}$ - wartość średnia [jednostka wielkości]

σ - odchylenie standardowe [jednostka wielkości]

VREF - napięcie odniesienia [V]

Wykaz ważniejszych skrótów

ADC - przetwornik analogowo-cyfrowy (Analog-to-Digital Converter)

CONWEP - model obliczeniowy oddziaływania konwencjonalnych środków wybuchowych (Conventional Weapons Effects)

CS - sygnał wyboru układu (Chip Select)

DAQ - system akwizycji danych (Data Acquisition)

DCLK - sygnał zegarowy transmisji danych (Data Clock)

EMI - zakłócenia elektromagnetyczne (Electromagnetic Interference)

FEM - metoda elementów skończonych (Finite Element Method)

GPIO - uniwersalne wejścia/wyjścia cyfrowe (General-Purpose Input/Output)

ICP - zintegrowany układ piezoelektryczny (Integrated Circuit Piezoelectric)

LS-DYNA - program do numerycznej analizy zjawisk dynamicznych metodą elementów skończonych

MEMS - systemy mikroelektromechaniczne (Micro-Electro-Mechanical Systems)

MISO - linia transmisji danych od urządzenia podrzędnego do nadrzędnego (Master In, Slave Out)

MOSI - linia transmisji danych od urządzenia nadrzędnego do podrzędnego (Master Out, Slave In)

PCB - płytka obwodu drukowanego (Printed Circuit Board); oznaczenie producenta PCB Piezotronics w nazwach czujników

SCADAS - system akwizycji danych i analizy sygnałów firmy Siemens

SPI - szeregowy interfejs urządzeń peryferyjnych (Serial Peripheral Interface)

TBI - urazowe uszkodzenie mózgu (Traumatic Brain Injury)

TNT - trotyl (trinitrotoluen)

Wstęp

Systemy mikroelektromechaniczne (MEMS, ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) stanowią dynamicznie rozwijającą się gałąź inżynierii, integrującą w jednej strukturze elementy mechaniczne, elektroniczne, a niekiedy również optyczne w skali mikro. Charakteryzują się miniaturyzacją, wysoką niezawodnością, niskim zużyciem energii oraz możliwością bezpośredniej integracji z układami elektronicznymi [1–3, 63]. Dzięki tym właściwościom znalazły szerokie zastosowanie w wielu obszarach techniki i nauki. W elektronice konsumenckiej wykorzystywane są m.in. do określania orientacji urządzeń mobilnych, rejestracji ruchu oraz rozpoznawania gestów [1, 2]. W przemyśle motoryzacyjnym stanowią istotny element systemów bezpieczeństwa, takich jak poduszki powietrzne czy układy stabilizacji toru jazdy [3]. W diagnostyce technicznej umożliwiają monitorowanie drgań oraz ocenę stanu technicznego maszyn i konstrukcji [4–6]. Zastosowanie znajdują również w naukach o Ziemi, wspierając badania zjawisk sejsmicznych [5, 7], a także w medycynie, gdzie wykorzystywane są m.in. w systemach monitorowania aktywności oraz urządzeniach rehabilitacyjnych [8]. W sektorze lotniczym i kosmicznym stanowią podstawę działania jednostek inercyjnych (IMU), wykorzystywanych w systemach nawigacyjnych [3, 7]. Tak szerokie spektrum zastosowań potwierdza ich istotną rolę we współczesnych systemach pomiarowych. Ze względu na wysoką czułość, niewielkie rozmiary oraz zdolność do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń, czujniki MEMS mogą stanowić alternatywę dla klasycznych metod pomiarowych również w analizie zjawisk impulsowych. Jednym z takich zagadnień jest oddziaływanie fali uderzeniowej na struktury konstrukcyjne, które wymaga rejestracji dynamicznych zmian przyspieszeń lub ciśnienia. Zastosowanie czujników MEMS w tego typu badaniach stanowi perspektywiczny kierunek rozwoju systemów pomiarowych.

1. Miejsce problemu w literaturze

Akcelerometry MEMS należą do najpowszechniej stosowanych czujników mikroelektromechanicznych wykorzystywanych w systemach do rejestracji przyspieszeń drgań oraz ruchu obiektów. Dynamiczny rozwój tej grupy sensorów wynika z możliwości integracji elementów mechanicznych i elektronicznych w ramach pojedynczego układu oraz korzystnego stosunku parametrów pomiarowych do kosztów wytwarzania. Współczesne kierunki rozwoju koncentrują się przede wszystkim na zwiększaniu czułości, rozszerzaniu pasma przenoszenia, poprawie parametrów użytkowych oraz doskonaleniu metod kalibracji [10–15]. Szczególną uwagę poświęca się konstrukcjom czujników przeznaczonym do zastosowań wymagających wysokiej dokładności pomiarowej, między innymi w sejsmologii, grawimetrii oraz systemach nawigacji inercyjnej [4, 7, 10–15].

Rozwój konstrukcji MEMS obejmuje zarówno modyfikacje geometrii struktur mechanicznych, jak i udoskonalenia układów elektronicznych odpowiedzialnych za przetwarzanie sygnału. Zastosowanie mechanicznych układów rezonansowych, zamkniętych pętli sprzężenia zwrotnego oraz zaawansowanych metod kompensacji zakłóceń umożliwiło uzyskanie czujników o wysokiej rozdzielczości pomiarowej oraz szerokim zakresie mierzonych przyspieszeń [10–15]. W ostatnich latach rozwijane są również metody autokalibracji umożliwiające dostrajanie parametrów pracy czujników bez konieczności wykorzystania specjalistycznych stanowisk laboratoryjnych [17]. Jednocześnie integracja z dedykowanymi układami ASIC (ang. Application-Specific Integrated Circuit) pozwala na realizację filtracji sygnału, kompensacji błędów oraz ograniczania wpływu szumów już na poziomie samego sensora [15].

Istotny postęp obserwowany jest także w obszarze technologii wytwarzania. Obok klasycznych procesów półprzewodnikowych rozwijane są techniki przyrostowe, w tym mikrodruk 3D wykorzystujący dwufotonową polimeryzację. Rozwiązania takie umożliwiają szybkie prototypowanie niestandardowych konstrukcji oraz skrócenie czasu opracowania nowych sensorów [16]. Badania wskazują, że konstrukcje

projektowane dla ściśle określonych zastosowań mogą osiągać lepsze parametry pomiarowe niż standardowe moduły typu Commercial Off-The-Shelf (COTS), szczególnie w zakresie czułości i poziomu szumów [4].

Akcelerometry MEMS znajdują obecnie zastosowanie w wielu obszarach techniki i nauki. W monitoringu strukturalnym wykorzystywane są do identyfikacji częstotliwości drgań własnych konstrukcji oraz oceny zmian ich stanu technicznego [4, 5, 12]. W geofizyce stosowane są do rejestracji aktywności sejsmicznej, obserwacji drgań gruntu oraz pomiarów grawimetrycznych [4, 10–12]. Znajdują również zastosowanie w diagnostyce przemysłowej, systemach transportowych, elektronice użytkowej oraz rozwiązaniach biomedycznych [7, 8, 16]. Niewielkie wymiary, niski pobór mocy oraz możliwość integracji z układami akwizycji i transmisji danych powodują, że sensory MEMS są coraz częściej wykorzystywane jako element rozproszonych systemów monitoringu i diagnostyki [5, 12, 54, 55].

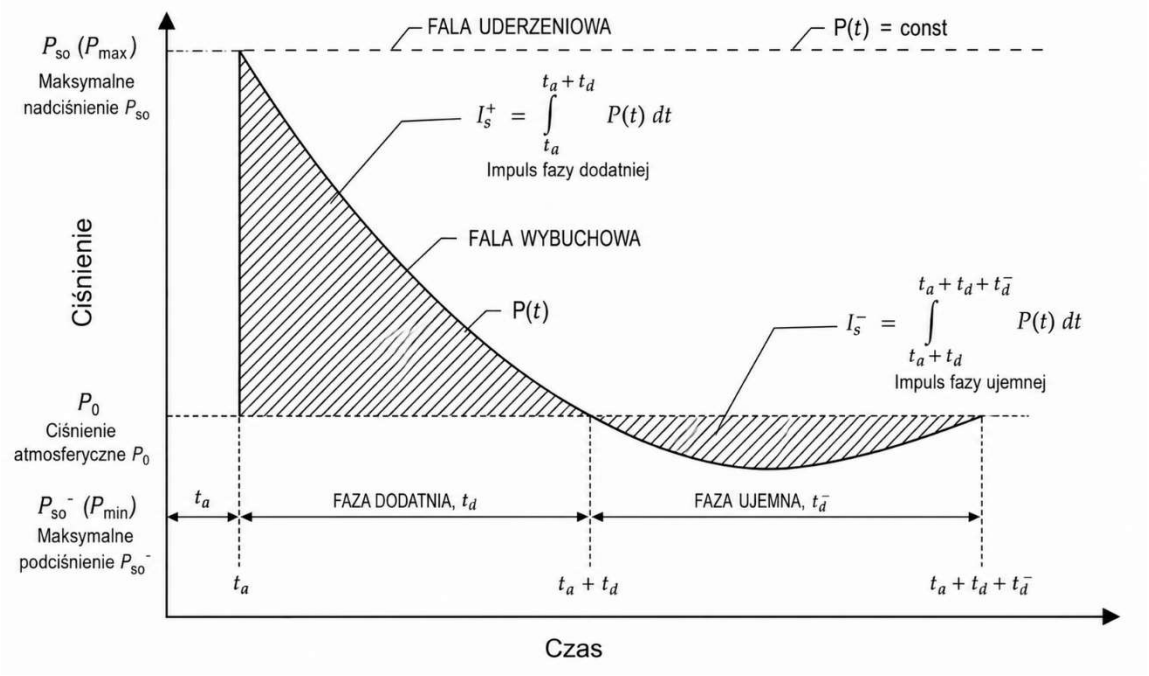
Równolegle rozwijane są nowe grupy akcelerometrów, obejmujące konstrukcje rezonansowe, belkowe oraz rozwiązania wykorzystujące zjawiska optyczne. Czujniki te charakteryzują się zwiększoną stabilnością długoterminową, wysoką rozdzielczością oraz możliwością pracy w wyspecjalizowanych zastosowaniach pomiarowych [11–13, 56]. Postęp w zakresie konstrukcji mechanicznych, technologii wytwarzania oraz metod przetwarzania sygnału powoduje, że akcelerometry MEMS stanowią obecnie jedną z najintensywniej rozwijanych grup czujników inercyjnych.

Właściwości akcelerometrów MEMS, obejmujące niewielkie wymiary, szeroki zakres pomiarowy, wskazują na ich potencjał w zastosowaniach związanych z analizą zjawisk impulsowych. W szczególności dotyczy to badań oddziaływania fali uderzeniowej na struktury mechaniczne, gdzie istotna jest rejestracja krótkotrwałych zmian przyspieszeń oraz odpowiedzi dynamicznej badanego obiektu.

Fale uderzeniowe powstające podczas detonacji materiałów wybuchowych należą do najbardziej intensywnych oddziaływań dynamicznych występujących w środowisku naturalnym i technicznym. Charakteryzują się gwałtownym wzrostem ciśnienia, temperatury oraz prędkości przepływu ośrodka, a ich oddziaływanie może obejmować obszary znacznie przekraczające bezpośrednią strefę wybuchu [26–30]. Z tego względu

zagadnienia związane z propagacją fal uderzeniowych stanowią przedmiot badań prowadzonych między innymi w inżynierii wojskowej, ochronie infrastruktury krytycznej, projektowaniu konstrukcji odpornych na wybuch oraz medycynie urazowej [26–28].

Fala uderzeniowa generowana podczas wybuchu charakteryzuje się gwałtownym wzrostem ciśnienia, po którym następuje faza rozprężania o malejącej amplitudzie ciśnienia [29,30]. W rzeczywistych warunkach propagacja fali może być dodatkowo modyfikowana przez odbicia od przeszkód, interferencję, dyfrakcję oraz oddziaływanie z podłożem. Zjawiska te prowadzą do lokalnych zmian rozkładu ciśnienia i naprężeń, które często wymagają zastosowania metod numerycznych lub badań eksperymentalnych do ich prawidłowego opisu [29,30].



Rys. 1.1. Przebieg ciśnienia w funkcji czasu fali wybuchowej wraz z kluczowymi parametrami wybuchu w porównaniu z falą uderzeniową [30]

Jednym z głównych skutków wybuchu jest powstanie fali uderzeniowej, która może oddziaływać na organizmy żywe oraz struktury mechaniczne. Znaczna część badań poświęcona jest analizie wpływu fali uderzeniowej na organizmy żywe, w szczególności na mechanizmy powstawania urazowego uszkodzenia mózgu (TBI) u osób narażonych na jej działanie [26–28]. W ujęciu przedstawionym na Rysunku 1.1. fala uderzeniowa

oznacza czoło fali charakteryzujące się gwałtownym wzrostem ciśnienia, natomiast przebieg fali wybuchowej obejmuje zmiany ciśnienia występujące w czasie po przejściu jej czoła, w tym fazę dodatnią i ujemną. Równolegle prowadzone są badania dotyczące oddziaływania fal uderzeniowych na konstrukcje inżynierskie, których celem jest określenie odporności materiałów oraz opracowanie skutecznych metod ochrony przed skutkami wybuchów.

Oddziaływanie fali uderzeniowej na konstrukcje może prowadzić do trwałych odkształceń, uszkodzeń lokalnych oraz utraty nośności elementów konstrukcyjnych [35]. W odpowiedzi na te zagrożenia rozwijane są materiały o podwyższonej odporności dynamicznej, w tym wysokowytrzymałe betony, kompozyty wzmacniane włóknami oraz konstrukcje wykorzystujące strefy kontrolowanej deformacji i elementy pochłaniające energię [35]. Pomimo postępu w tym obszarze nadal istotnym problemem pozostaje określenie rzeczywistego oddziaływania fali na elementy konstrukcyjne oraz walidacja modeli numerycznych wykorzystywanych do prognozowania skutków wybuchów.

Badania eksperymentalne fal uderzeniowych realizowane są zarówno w warunkach poligonowych, jak i laboratoryjnych. Ze względu na trudności związane z odtworzeniem rzeczywistych warunków wybuchu w skali laboratoryjnej powszechnie stosuje się połączenie badań eksperymentalnych z analizami numerycznymi. Wyniki eksperymentów służą do określenia parametrów badanego zjawiska i porównania ich z wynikami obliczeń, natomiast analiza numeryczna umożliwia ocenę odpowiedzi układu w warunkach trudnych do odtworzenia eksperymentalnie [28, 30, 33]. W zależności od charakteru problemu wykorzystuje się modele analityczne opisujące propagację fal sferycznych, cylindrycznych lub płaskich [34, 57] oraz zaawansowane narzędzia numeryczne umożliwiające analizę zjawisk zachodzących w złożonych układach geometrycznych [58–60].

Współcześnie do analizy oddziaływania wybuchów szeroko wykorzystywane są programy bazujące na metodzie elementów skończonych między innymi LS-DYNA oraz ANSYS Autodyn [59]. Umożliwiają one modelowanie propagacji fali uderzeniowej, interakcji z konstrukcją oraz zjawisk takich jak odbicie, dyfrakcja

lub interferencja fal. Narzędzia te stanowią obecnie podstawowe wsparcie dla badań eksperymentalnych prowadzonych w zakresie oddziaływania wybuchów na obiekty techniczne.

Ważnym nurtem badań związanych z falami uderzeniowymi pozostaje analiza ich wpływu na organizmy żywe. Liczne eksperymenty wskazują, że nawet stosunkowo niewielkie wartości nadciśnienia mogą prowadzić do występowania łagodnych urazów mózgu (mTBI) oraz zmian w funkcjonowaniu układu nerwowego [26, 27, 31]. Wyniki tych badań przyczyniły się do rozwoju środków ochrony indywidualnej oraz procedur ograniczających skutki oddziaływania wybuchów na człowieka [26–28]. Równolegle prowadzone są badania dotyczące wpływu fal uderzeniowych na konstrukcje techniczne, których celem jest określenie mechanizmów uszkodzeń oraz opracowanie metod zwiększania odporności obiektów na obciążenia impulsowe [35].

Obok rozwoju metod modelowania i badań eksperymentalnych coraz większą uwagę poświęca się technikom pomiarowym umożliwiającym rejestrację parametrów fali uderzeniowej oraz odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. W tym obszarze szczególne znaczenie mają mikrosystemy elektromechaniczne MEMS, które dzięki niewielkim wymiarom, małemu poborowi mocy oraz możliwości pracy w układach wielokanałowych znajdują zastosowanie w badaniach zjawisk dynamicznych [7, 10, 11]. Rozwój technologii MEMS umożliwił budowę czujników zdolnych do pracy w szerokim zakresie częstotliwości i amplitud przyspieszeń, co pozwala na ich wykorzystanie zarówno w monitoringu konstrukcji, jak i analizie oddziaływania wybuchów [7, 15, 23].

Szczególne znaczenie mają akcelerometry MEMS stosowane do rejestracji krótkotrwałych impulsów dynamicznych występujących podczas detonacji materiałów wybuchowych. Czujniki tego typu wykorzystywane są między innymi w analizie bezpieczeństwa pojazdów wojskowych, monitoringu konstrukcji ochronnych oraz walidacji modeli numerycznych opisujących oddziaływanie fali uderzeniowej [36–44]. Poprawna rejestracja takich zjawisk wymaga jednak nie tylko odpowiednich parametrów samego sensora, ale również właściwie zaprojektowanego toru

pomiarowego obejmującego układy kondycjonowania sygnału, przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz rejestracji danych [45, 46].

W przypadku badań impulsowych szczególne znaczenie mają częstotliwość próbkowania, przepustowość systemu akwizycji oraz odporność toru pomiarowego na zakłócenia. Wymagania te powodują, że rozwój czujników MEMS jest ściśle związany z rozwojem systemów pomiarowych [45–53]. Zagadnienia związane z konstrukcją takich systemów stanowią obecnie istotny kierunek badań w obszarze technik pomiarowych.

W ostatnich latach obserwowany jest wyraźny wzrost zainteresowania wykorzystaniem mikroelektromechanicznych układów sensorycznych MEMS w badaniach związanych z oddziaływaniem wybuchów oraz rejestracją krótkotrwałych zjawisk udarowych. Tradycyjnie pomiary tego typu realizowane były z wykorzystaniem piezoelektrycznych akcelerometrów laboratoryjnych oraz specjalistycznych systemów akwizycji danych. Postępująca miniaturyzacja układów MEMS, poprawa ich własności dynamicznych oraz rozwój technologii półprzewodnikowych spowodowały jednak stopniowe rozszerzanie obszaru ich zastosowań na zagadnienia związane z bezpieczeństwem konstrukcji, monitorowaniem oddziaływania wybuchów oraz analizą odpowiedzi dynamicznej obiektów inżynierskich [47–50]. Szczególnie istotne okazały się niewielkie wymiary sensorów, mały pobór energii oraz możliwość integracji układu pomiarowego, przetwarzania sygnału i komunikacji w ramach jednego urządzenia. Cechy te umożliwiają budowę rozproszonych i autonomicznych systemów pomiarowych przeznaczonych do pracy również w warunkach poligonowych, gdzie stosowanie klasycznej aparatury laboratoryjnej jest utrudnione lub ekonomicznie nieuzasadnione [48, 51].

Jednym z kierunków rozwoju zastosowań akcelerometrów MEMS w badaniach oddziaływań wybuchowych jest ich wykorzystanie do oceny skutków obciążeń dynamicznych działających na pojazdy wojskowe oraz ich załogi. W literaturze opisano między innymi wielokanałowe autonomiczne systemy pomiarowe wykorzystujące układy MEMS do rejestracji przyspieszeń konstrukcji pojazdu podczas detonacji min i improwizowanych ładunków wybuchowych. Rozwiązania tego typu umożliwiają

jednoczesny pomiar odpowiedzi dynamicznej wielu punktów konstrukcji przy zachowaniu niewielkich rozmiarów i masy aparatury [47, 51]. Wyniki badań wskazują, że odpowiednio dobrane akcelerometry MEMS mogą stanowić skuteczną alternatywę dla stosowanych dotychczas akcelerometrów piezoelektrycznych w badaniach odporności przeciwminowej oraz analizach bezpieczeństwa pojazdów specjalnych [47].

Drugim istotnym obszarem zastosowań są pomiary drgań i oddziaływań wywołanych robotami strzałowymi oraz eksplozjami prowadzonymi w przemyśle wydobywczym. W wielu pracach przedstawiono systemy wykorzystujące akcelerometry MEMS jako elementy bezprzewodowych systemów pomiarowych przeznaczonych do monitorowania drgań górotworu i oceny wpływu robót strzałowych na otaczającą infrastrukturę [48, 52, 87]. Zastosowanie rozproszonych układów pomiarowych umożliwia prowadzenie wielopunktowej rejestracji drgań przy ograniczonych kosztach infrastruktury pomiarowej oraz zwiększa elastyczność rozmieszczenia punktów pomiarowych. Badania porównawcze wykazały, że nowoczesne akcelerometry MEMS mogą zapewniać dokładność wystarczającą do zastosowań związanych z monitorowaniem drgań wywołanych wybuchami, analizą stanu technicznego konstrukcji oraz systemami Structural Health Monitoring [48, 59, 86].

Kolejnym istotnym obszarem zastosowań akcelerometrów MEMS są badania balistyczne oraz pomiary przeciążeń występujących podczas wystrzału pocisków, amunicji artyleryjskiej i innych obiektów poddawanych obciążeniom dynamicznym. W tego typu zastosowaniach czujnik musi zachować zdolność pomiarową podczas oddziaływania krótkotrwałych impulsów przyspieszenia osiągających wartości od kilku do kilkudziesięciu tysięcy g, a w niektórych przypadkach przekraczających nawet 100 000 g [89–92]. Wymaga to odpowiedniego doboru zakresu pomiarowego, pasma przenoszenia oraz parametrów mechanicznych struktury sensora, tak, aby możliwa była rejestracja impulsów o bardzo krótkim czasie narastania bez istotnego zniekształcenia odpowiedzi [89, 90, 92, 93]. W literaturze opisano zastosowanie akcelerometrów MEMS w badaniach balistycznych i systemach uzbrojenia, między innymi do rejestracji przeciążeń występujących podczas wystrzału

oraz diagnostyki działania zapalników i innych elementów układów uzbrojenia [89, 91, 94].

Wysokie wymagania dotyczące parametrów dynamicznych doprowadziły do rozwoju specjalizowanych konstrukcji akcelerometrów MEMS, zarówno piezorezystancyjnych, jak i pojemnościowych. W projektowaniu tego typu sensorów szczególną uwagę zwraca się na geometrię elementów zawieszenia masy sejsmicznej oraz ograniczenie naprężeń powstających w strukturze podczas działania wysokich przeciążeń. Istotnym parametrem jest również częstotliwość własna układu, której odpowiedni dobór pozwala ograniczyć wpływ właściwości rezonansowych na rejestrowany sygnał [89, 90, 92]. W konstrukcjach przeznaczonych do pomiaru bardzo dużych przeciążeń stosuje się również rozwiązania zwiększające sztywność struktury oraz ograniczające maksymalne przemieszczenie masy sejsmicznej, co pozwala ograniczyć ryzyko uszkodzenia elementów mechanicznych podczas udaru.

W wielu opracowaniach wskazuje się, że klasyczne akcelerometry laboratoryjne nie zawsze mogą być stosowane w pomiarach balistycznych ze względu na ograniczenia związane z masą, wymiarami lub odpornością mechaniczną [89, 93]. Zastosowanie technologii MEMS umożliwia budowę miniaturowych systemów pomiarowych integrowanych bezpośrednio z badanym obiektem. Pozwala to na rejestrację parametrów ruchu w miejscach trudno dostępnych dla tradycyjnej aparatury oraz ograniczenie wpływu układu pomiarowego na właściwości dynamiczne badanego obiektu [91, 94]. Rozwiązania takie wykorzystywane są między innymi podczas badań amunicji inteligentnej, systemów naprowadzania, zapalników elektronicznych oraz konstrukcji przeznaczonych do pracy w warunkach wysokich przeciążeń [89, 94].

Pomimo znaczącego postępu technologicznego nadal obserwowane są problemy związane z interpretacją wyników uzyskiwanych podczas pomiarów wymuszeń udarowych. W literaturze podkreśla się wpływ częstotliwości własnej sensora, tłumienia struktury oraz sposobu montażu czujnika na rejestrowany przebieg sygnału [90, 92, 93]. W przypadku bardzo krótkich impulsów dynamicznych właściwości mechaniczne czujnika mogą wpływać na amplitudę, czas trwania oraz kształt rejestrowanego sygnału, powodując jego zniekształcenie względem rzeczywistego wymuszenia. Z tego względu

coraz większą uwagę poświęca się opracowywaniu modeli umożliwiających analizę zachowania akcelerometrów MEMS w warunkach wysokich przeciążeń oraz krótkotrwałych obciążeń impulsowych występujących podczas zjawisk udarowych, balistycznych i wybuchowych [90, 92].

Równolegle rozwijane są specjalizowane konstrukcje akcelerometrów MEMS przeznaczone do pracy w warunkach bardzo wysokich przeciążeń. W literaturze opisywane są czujniki typu high-g umożliwiające rejestrację impulsów o amplitudach przekraczających dziesiątki, a nawet setki tysięcy g przeznaczone między innymi do badań balistycznych, analiz zjawisk udarowych oraz monitorowania procesów detonacyjnych [50, 88–90]. Pomimo intensywnego rozwoju tej grupy sensorów większość publikacji koncentruje się na konstrukcji czujników oraz rejestracji sygnałów pomiarowych. Znacznie rzadziej analizowana jest odpowiedź dynamiczna samego sensora oraz wpływ jego parametrów mechanicznych na interpretację wyników pomiarowych podczas oddziaływania krótkotrwałych impulsów generowanych przez falę uderzeniową. Ograniczona liczba takich opracowań wskazuje na potrzebę dalszych badań obejmujących zarówno eksperymentalną identyfikację właściwości czujników MEMS, jak i opracowanie modeli umożliwiających analizę ich zachowania w warunkach obciążeń impulsowych podczas oddziaływania fali wybuchu.

Pomimo szerokiego wykorzystania czujników MEMS w zastosowaniach pomiarowych nadal istotnym zagadnieniem pozostaje modelowanie ich odpowiedzi dynamicznej. W literaturze opisywane są zarówno modele o parametrach skupionych bazujące na układzie masa–sprężyna–tłumik, jak i bardziej złożone modele elektromechaniczne oraz modele wykorzystujące metodę elementów skończonych do analizy zachowania struktury sensora [70, 80, 81, 95, 96]. Podejścia te umożliwiają analizę wpływu parametrów geometrycznych, właściwości materiałowych oraz warunków pracy na charakterystyki dynamiczne czujnika.

Znaczna część publikacji dotyczących modelowania MEMS koncentruje się na projektowaniu nowych konstrukcji sensorów oraz optymalizacji ich parametrów użytkowych. Parametry modeli wyznaczane są najczęściej na podstawie założeń projektowych, danych technologicznych lub informacji udostępnianych

przez producenta czujnika [70, 80, 81, 95]. Powszechnie stosowane są również modele behawioralne oraz modele o parametrach skupionych umożliwiające analizę odpowiedzi układu bez konieczności szczegółowego odwzorowania geometrii struktury [80, 81, 95].

Rzadziej spotykane są natomiast opracowania obejmujące identyfikację rzeczywistej struktury istniejącego czujnika oraz wyznaczanie parametrów modelu na podstawie badań eksperymentalnych. W szczególności ograniczona jest liczba prac łączących analizę materiałową, pomiary geometryczne oraz eksperymentalną identyfikację właściwości dynamicznych w celu opracowania modelu konkretnego sensora wykorzystywanego w badaniach eksperymentalnych [70, 96, 97]. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku rejestracji krótkotrwałych impulsów dynamicznych, gdzie właściwości mechaniczne samego czujnika mogą wpływać na kształt rejestrowanego sygnału.

W związku z tym obserwowany jest wzrost zainteresowania budowaniem modeli umożliwiających powiązanie rzeczywistej budowy czujnika z jego odpowiedzią dynamiczną. Podejście takie pozwala nie tylko na analizę zachowania sensora, lecz również na ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych na jakość rejestrowanych danych oraz interpretację wyników pomiarowych uzyskiwanych podczas badań zjawisk impulsowych [96, 97].

Pomimo rosnącego wykorzystania czujników MEMS w systemach pomiarowych stosowanych do rejestracji oddziaływania fali wybuchowej ich zastosowanie wiąże się z ograniczeniami wynikającymi zarówno z właściwości samego sensora, jak i charakteru rejestrowanych zjawisk. W przeciwieństwie do typowych pomiarów przyspieszenia, fala uderzeniowa charakteryzuje się bardzo krótkim czasem narastania impulsu, wysoką amplitudą oraz znacznym udziałem składowych wysokoczęstotliwościowych. W takich warunkach odpowiedź czujnika zależy nie tylko od parametrów wymuszenia, lecz również od właściwości dynamicznych i struktury mechanicznej sensora [80, 92, 94].

Jednym z podstawowych problemów jest ograniczone pasmo przenoszenia sensora oraz występowanie częstotliwości rezonansowych związanych z budową elementu

pomiarowego. Jeżeli częstotliwości składowych sygnału zbliżają się do częstotliwości drgań własnych czujnika, odpowiedź układu może ulegać lokalnemu wzmocnieniu lub zniekształceniu. Zjawisko to ma szczególne znaczenie podczas rejestracji krótkotrwałych impulsów udarowych, gdzie znacząca część energii sygnału skupiona jest w szerokim paśmie częstotliwości [80, 98, 99]. W literaturze podkreśla się, że nieuwzględnienie właściwości dynamicznych sensora może prowadzić do błędnej interpretacji wartości maksymalnych przyspieszeń oraz przebiegów czasowych rejestrowanych podczas eksperymentów wybuchowych [92, 99].

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest wpływ sposobu montażu czujnika na odpowiedź całego układu pomiarowego. Sztywność połączenia pomiędzy sensorem a badaną konstrukcją, obecność warstw pośrednich oraz lokalne właściwości podłoża mogą wpływać na przenoszenie drgań do elementu pomiarowego [94, 100]. W przypadku bardzo krótkich impulsów dynamicznych nawet niewielkie zmiany warunków montażowych mogą prowadzić do zauważalnych różnic w rejestrowanych sygnałach. Problem ten jest szczególnie istotny podczas badań terenowych, gdzie warunki instalacji czujników często odbiegają od idealnych warunków laboratoryjnych.

W licznych opracowaniach zwraca się również uwagę na wpływ przeciążeń występujących podczas wybuchów na trwałość i niezawodność mikrostruktur MEMS [32, 89, 92]. Krótkotrwałe impulsy o dużej amplitudzie mogą prowadzić do uszkodzeń elementów zawieszenia masy sejsmicznej, zmian parametrów lub powstania nieliniowości odpowiedzi. Z tego względu rozwijane są specjalizowane konstrukcje typu high-g, przeznaczone do pracy w środowiskach charakteryzujących się wysokimi przeciążeniami i znacznymi obciążeniami udarowymi [32, 89].

Wyzwaniem pozostaje interpretacja sygnałów rejestrowanych podczas oddziaływania fali uderzeniowej. W wielu przypadkach sygnał wyjściowy stanowi superpozycję odpowiedzi konstrukcji, odpowiedzi samego sensora oraz wpływu toru pomiarowego [80, 94, 98]. Powoduje to trudności w jednoznacznym określeniu rzeczywistego przebiegu wymuszenia działającego na badaną strukturę. W konsekwencji coraz większą uwagę poświęca się opracowywaniu modeli

umożliwiających analizę zachowania czujników MEMS oraz ocenę wpływu ich parametrów dynamicznych na rejestrowane wyniki pomiarowe [70, 99, 100].

2. Teza, cel i zakres pracy

Teza pracy

Mikroelektromechaniczne akcelerometry MEMS mogą być wykorzystywane do rejestracji i analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wybuchu, pod warunkiem uwzględnienia właściwości dynamicznych sensora.

Celem pracy było opracowanie systemu pomiarowego opartego na mikroelektromechanicznym czujniku (MEMS), przeznaczonego do rejestracji oraz analizy oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na struktury mechaniczne. System przygotowano do realizacji badań w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych.

W ramach pracy opracowano układ akwizycji danych umożliwiający rejestrację sygnałów generowanych przez czujnik MEMS podczas oddziaływania krótkotrwałych impulsów dynamicznych. Systemu użyto podczas eksperymentów laboratoryjnych oraz badań terenowych z użyciem ładunków wybuchowych.

Istotnym elementem pracy było porównanie wyników uzyskanych podczas badań terenowych z wynikami analiz numerycznych oddziaływania fali uderzeniowej. Obliczenia metodą elementów skończonych przeprowadzono na opracowanym modelu numerycznym w środowisku LS-DYNA. Analizy przeprowadzono z zastosowaniem modelu Friedlandera oraz metody CONWEP w celu określenia odpowiedzi badanej struktury na działanie fali uderzeniowej.

W kolejnym etapie prac przeprowadzono identyfikację budowy badanego czujnika MEMS oraz opracowano jego model matematyczny opisujący zjawiska mechaniczne, elektryczne i elektromechaniczne. W celu prawidłowej interpretacji rejestrowanych sygnałów wykonano analizę struktury sensora oraz wyznaczono jego podstawowe parametry geometryczne i materiałowe. Wykorzystano w tym celu skaningową mikroskopię elektronową (SEM), spektroskopię energii dyspersyjnej (EDS),

mikrotomografię komputerową, interferometrię optyczną oraz analizę z wykorzystaniem systemu Polytec MSA-500.

Na podstawie wyników badań opracowano matematyczny model czujnika MEMS opisujący jego odpowiedź na wymuszenia dynamiczne. Następnie przygotowano model numeryczny w środowisku MATLAB/Simulink i przeprowadzono analizę odpowiedzi układu dla zadanych wymuszeń.

Poprawność opracowanego modelu zweryfikowano na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Porównano sygnały uzyskane na drodze badań eksperymentalnych z wynikami symulacji numerycznych, określając zgodność modelu z rzeczywistą odpowiedzią wybranego typu czujnika MEMS.

Zakres pracy obejmuje:

- Analizę literatury dotyczącą zastosowania czujników MEMS do pomiarów zjawisk dynamicznych;
- Opracowanie koncepcji systemu akwizycji danych;
- Wykonanie prototypu systemu pomiarowego i walidacji jego parametrów;
- Realizację eksperymentów doświadczalnych identyfikacji przyspieszeń i drgań;
- Opracowanie modelu numerycznego fali wybuchowej w środowisku LS-DYNA;
- Analizę porównawczą wyników eksperymentów terenowych z wynikami analiz numerycznych;
- Badania doświadczalne struktury oraz właściwości dynamicznych czujnika MEMS;
- Opracowanie modelu matematycznego i numerycznego wybranego typu czujnika MEMS;
- Weryfikację modelu numerycznego czujnika MEMS.

3. Projekt i walidacja systemu akwizycji danych

Badania oddziaływania fali uderzeniowej na struktury mechaniczne wymagają stosowania układów pomiarowych umożliwiających rejestrację szybkozmiennych zjawisk dynamicznych o dużej amplitudzie oraz krótkim czasie narastania impulsu. W praktyce pomiarowej analizowane są przede wszystkim przebiegi ciśnienia, przyspieszeń oraz przemieszczeń konstrukcji poddanych działaniu wybuchu [65, 66].

W badaniach oddziaływań wybuchowych do rejestracji parametrów dynamicznych powszechnie stosuje się akcelerometry piezoelektryczne oraz czujniki ciśnienia. Rozwiązania te charakteryzują się szerokim pasmem pomiarowym, dużą odpornością na przeciążenia oraz możliwością rejestracji szybkozmiennych sygnałów występujących podczas zjawisk typu „pyroshock" oraz oddziaływania fali uderzeniowej [66, 67]. Akcelerometry piezoelektryczne oraz piezorezystancyjne czujniki typu high-g znajdują zastosowanie między innymi w badaniach balistycznych, testach zderzeniowych oraz analizie oddziaływania wybuchów na konstrukcje wojskowe [67, 68].

Pomimo wysokiej dokładności powyższe systemy pomiarowe posiadają jednak istotne ograniczenia. Wymagają stosowania przewodowych torów transmisji sygnału, zewnętrznych układów kondycjonowania oraz specjalistycznych systemów akwizycji danych. W przypadku eksperymentów terenowych powoduje to wzrost złożoności całego stanowiska pomiarowego oraz zwiększa podatność układu na zakłócenia elektromagnetyczne i uszkodzenia mechaniczne przewodów podczas wybuchu [66, 69].

W systemach pomiarowych do identyfikacji odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych szeroko wykorzystywane są również tensometry oraz czujniki optyczne. Tensometry umożliwiają bezpośredni pomiar odkształceń lokalnych elementów konstrukcyjnych i są wykorzystywane między innymi podczas badań paneli ochronnych, konstrukcji pojazdów oraz elementów nośnych poddawanych oddziaływaniu impulsowemu [65]. Ograniczeniem tej techniki jest konieczność odpowiedniego przygotowania powierzchni pomiarowej oraz niewielka odporność układu pomiarowego na uszkodzenia mechaniczne.

Alternatywę stanowią metody bezkontaktowe wykorzystujące laserowe wibrometry dopplerowskie oraz systemy szybkich kamer. Techniki te umożliwiają analizę deformacji oraz drgań konstrukcji bez konieczności bezpośredniej integracji sensora z badanym obiektem. Stosowane są między innymi podczas badań laboratoryjnych konstrukcji cienkościennych oraz analiz odpowiedzi dynamicznej materiałów kompozytowych [65, 38]. W warunkach terenowych wykorzystanie metod optycznych jest jednak utrudnione ze względu na wpływ warunków środowiskowych, zapylenie oraz konieczność zachowania bezpośredniej widoczności badanego obiektu.

W ostatnich latach obserwowany jest wyraźny wzrost zainteresowania wykorzystaniem mikroelektromechanicznych układów sensorycznych typu MEMS w badaniach zjawisk dynamicznych oraz systemach monitorowania stanu konstrukcji [71, 72]. Wynika to przede wszystkim z niewielkich wymiarów sensorów, małego poboru energii oraz niskiego kosztu implementacji. Czujniki MEMS są obecnie stosowane między innymi w monitorowaniu drgań konstrukcji budowlanych, diagnostyce maszyn, analizie sejsmicznej oraz systemach Structural Health Monitoring (SHM) [71, 73, 74].

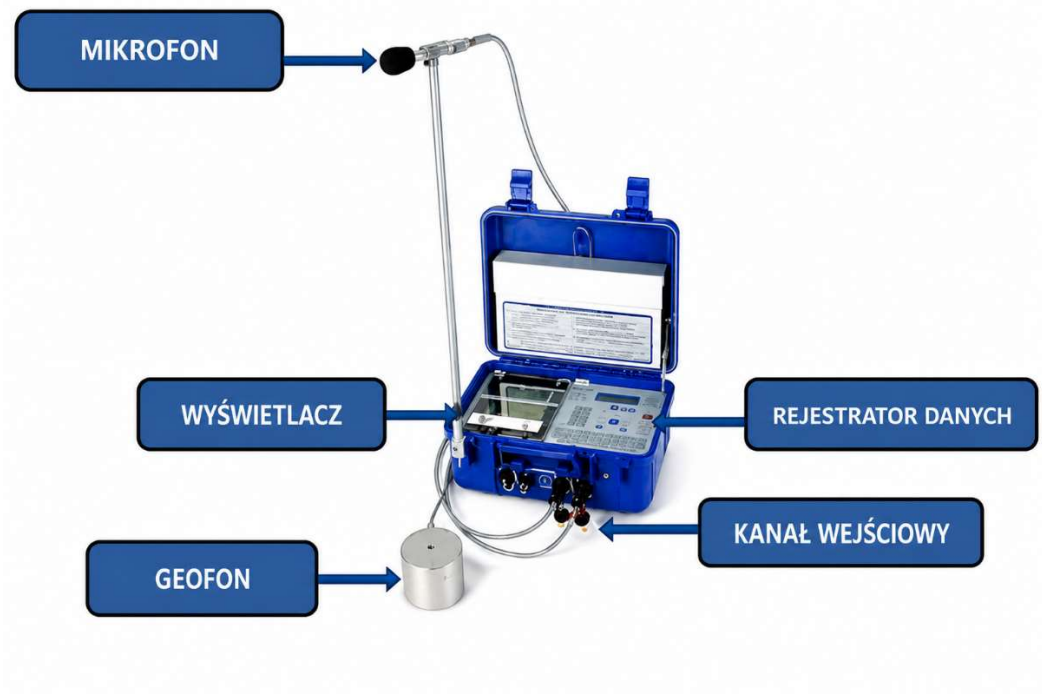
Istotną zaletą czujników MEMS jest możliwość integracji sensora, układu kondycjonowania sygnału oraz systemu akwizycji danych w ramach jednego kompaktowego urządzenia pomiarowego. Pozwala to na budowę autonomicznych systemów rejestracji przeznaczonych do pracy w warunkach terenowych oraz w ośrodkach o podwyższonym poziomie przeciążeń [38, 73].

W zastosowaniach związanych z oddziaływaniem fali wybuchu szczególne znaczenie mają akcelerometry MEMS typu high-g. Czujniki tego typu umożliwiają rejestrację bardzo krótkich impulsów dynamicznych o amplitudach dochodzących do dziesiątek lub setek tysięcy g [75]. W literaturze opisano między innymi konstrukcje piezorezystancyjnych akcelerometrów MEMS przeznaczonych do rejestracji impulsów o amplitudach przekraczających 100000 g przy częstotliwościach własnych rzędu setek kilohertzów [75].

Zastosowanie czujników MEMS w badaniach obejmuje obecnie zarówno pomiary laboratoryjne, jak i eksperymenty terenowe. W pracy [38] przedstawiono autonomiczny system pomiarowy ARMS wykorzystujący akcelerometry MEMS do oceny

oddziaływania fali wybuchu na załogi pojazdów specjalnych. System umożliwia rejestrację przyspieszeń konstrukcji pojazdu podczas detonacji ładunków wybuchowych w warunkach poligonowych. Zastosowanie lokalnej rejestracji danych pozwoliło ograniczyć długość przewodów pomiarowych oraz zwiększyć odporność układu na uszkodzenia mechaniczne podczas eksperymentu [38].

Podobne rozwiązania wykorzystywane są również w przemyśle wydobywczym oraz monitorowaniu drgań górotworu. W pracy [76] przedstawiono bezprzewodowy system pomiarowy WSN przeznaczony do monitorowania drgań wywołanych robotami strzałowymi. System oparto na akcelerometrach MEMS oraz komunikacji bezprzewodowej ZigBee. Autorzy wskazują, że zastosowanie rozproszonych systemów pomiarowych (Rys. 3.1.) umożliwia prowadzenie wielopunktowej rejestracji drgań przy ograniczeniu kosztów infrastruktury pomiarowej [76].



Rys. 3.1. Przykładowy system pomiarowy [76]

Współczesne systemy monitorowania drgań coraz częściej wykorzystują również rozwiązania IoT umożliwiające zdalną transmisję danych oraz bieżącą analizę parametrów dynamicznych konstrukcji [77, 78]. W pracy [77] przedstawiono autonomiczny system monitorowania drgań pochodzenia wybuchowego wykorzystujący czujniki MEMS oraz algorytmy uczenia maszynowego

do prognozowania poziomu drgań gruntu podczas robót strzałowych. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania kompaktowych układów MEMS jako alternatywy dla klasycznych sejsmografów terenowych [77].

Istotnym zagadnieniem podczas projektowania systemów pomiarowych do badań wybuchowych pozostaje odpowiedni dobór częstotliwości próbkowania oraz parametrów dynamicznych sensora. Fala uderzeniowa charakteryzuje się bardzo krótkim czasem narastania impulsu oraz obecnością wysokoczęstotliwościowych składowych sygnału. Układ pomiarowy musi zatem zapewniać odpowiednio szerokie pasmo przenoszenia oraz dużą częstotliwość próbkowania, często przekraczającą dziesiątki lub setki kilohertzów [65, 66, 67].

W przypadku czujników MEMS na jakość rejestrowanego sygnału wpływają również właściwości dynamiczne struktury mechanicznej sensora, w szczególności częstotliwość własna, tłumienie oraz sposób jego zamocowania [79]. Niewłaściwy dobór parametrów dynamicznych w stosunku do charakteru mierzonego wymuszenia może prowadzić do zniekształcenia odpowiedzi układu podczas rejestracji krótkotrwałych impulsów [67, 79].

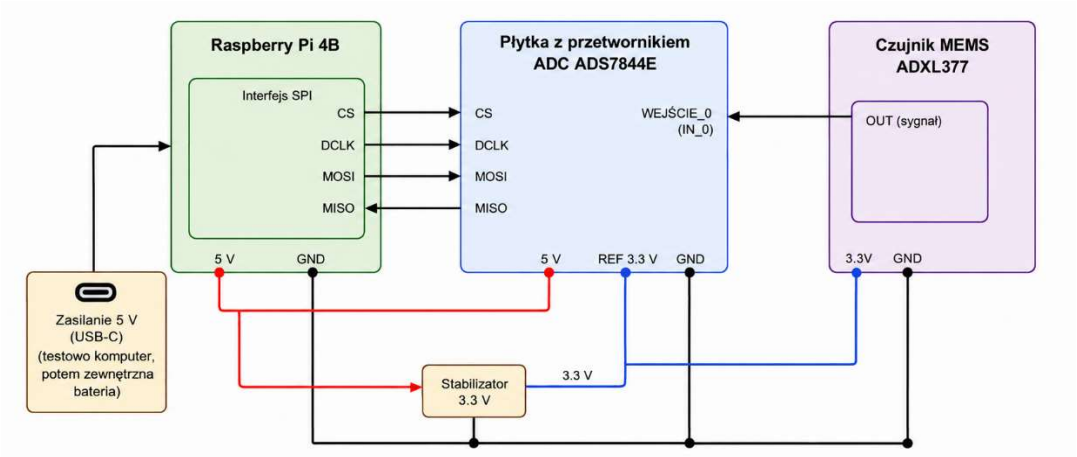
Pomimo dynamicznego rozwoju technologii MEMS nadal ograniczona jest liczba opracowań dotyczących wykorzystania tych układów do analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych działaniu fali uderzeniowej. Większość dostępnych prac koncentruje się na rejestracji przyspieszeń lub monitorowaniu zagrożenia dla organizmów żywych, natomiast rzadziej analizowana jest odpowiedź samego sensora oraz wpływ jego parametrów dynamicznych na interpretację wyników pomiarowych [38, 71]. Z tego względu istotne pozostaje opracowanie modeli umożliwiających analizę odpowiedzi czujników MEMS podczas rejestracji krótkotrwałych impulsów dynamicznych wywołanych oddziaływaniem fali uderzeniowej.

3.1 System akwizycji danych

Poprawna rejestracja odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wymaga zastosowania układu pomiarowego zapewniającego odpowiednio wysoką częstotliwość próbkowania, rozdzielczość pomiarową oraz przepustowość transmisji danych [45–53]. W przypadku krótkotrwałych impulsów dynamicznych istotne znaczenie ma również ograniczenie zakłóceń toru pomiarowego oraz zapewnienie niezawodnej rejestracji danych w warunkach eksperymentów terenowych [45, 46].

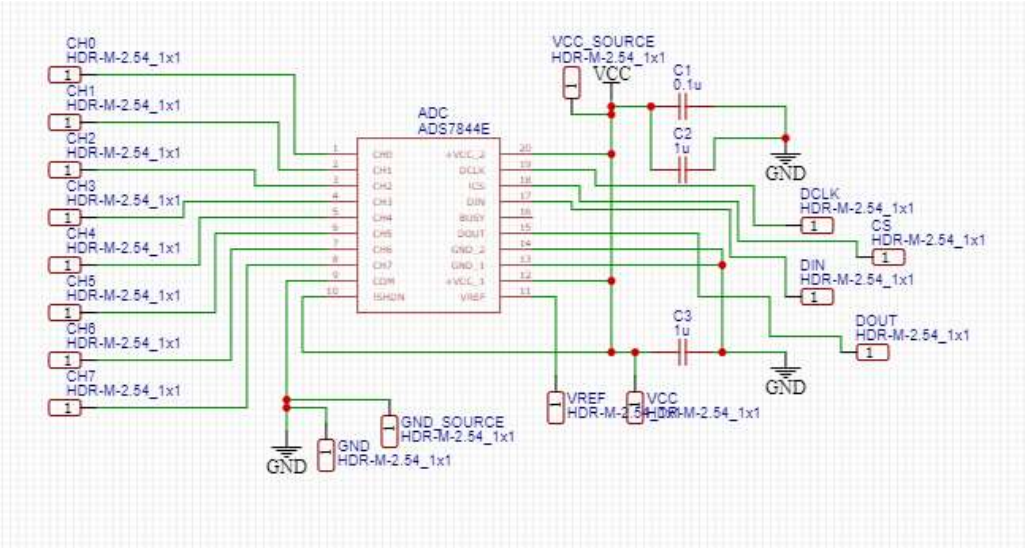
W celu realizacji badań opracowano dedykowany system akwizycji danych przeznaczony do współpracy z czujnikami MEMS. Układ zbudowano w oparciu o minikomputer Raspberry Pi 4B, który zapewnia dostęp do interfejsów komunikacyjnych, możliwość współpracy z zewnętrznymi przetwornikami analogowo-cyfrowymi oraz otwartą konfigurację oprogramowania. Przyjęta architektura umożliwia rejestrację sygnałów pomiarowych oraz ograniczenie długości analogowego toru sygnałowego pomiędzy czujnikiem a układem przetwarzania danych.

Opracowany system umożliwia rejestrację sygnałów z wysoką częstotliwością próbkowania przy zachowaniu stabilności transmisji i zapisu danych. Na rysunku 3.2. przedstawiono schemat blokowy opracowanego systemu, obejmujący układ akwizycji danych, przetwornik analogowo-cyfrowy oraz czujnik MEMS wraz z połączeniami zasilającymi i komunikacyjnymi.



Rys. 3.2. Schemat blokowy opracowanego systemu akwizycji danych z czujnikiem MEMS ADXL377

Schemat elektryczny (Rys. 3.3.) przedstawia układ akwizycji danych oparty na przetworniku analogowo-cyfrowym (ADC) w obudowie QSOP-20. Ze względu na niewielkie wymiary oraz ograniczenia technologiczne związane z bezpośrednim montażem tego typu układów, zastosowano płytkę pośrednią umożliwiającą wyprowadzenie wszystkich pinów przetwornika na dostępne pola lutownicze. Rozwiązanie to umożliwia integrację układu z pozostałymi elementami systemu oraz zapewnia dostęp do linii sygnałowych i zasilających. Płytka pełni również funkcję rozszerzenia połączeń, umożliwiając podłączenie dodatkowych elementów układu, takich jak stabilizacja napięcia lub podstawowe zabezpieczenia sygnałowe. Komunikację pomiędzy przetwornikiem a jednostką centralną zrealizowano z wykorzystaniem interfejsu SPI. Połączenia obejmują linie zasilania, masy oraz sygnały komunikacyjne, prowadzone bezpośrednio pomiędzy układami. Sygnał z czujnika doprowadzono bezpośrednio do wejść przetwornika, co umożliwia jego próbkowanie z wysoką częstotliwością i minimalizuje wpływ dodatkowych elementów toru pomiarowego.

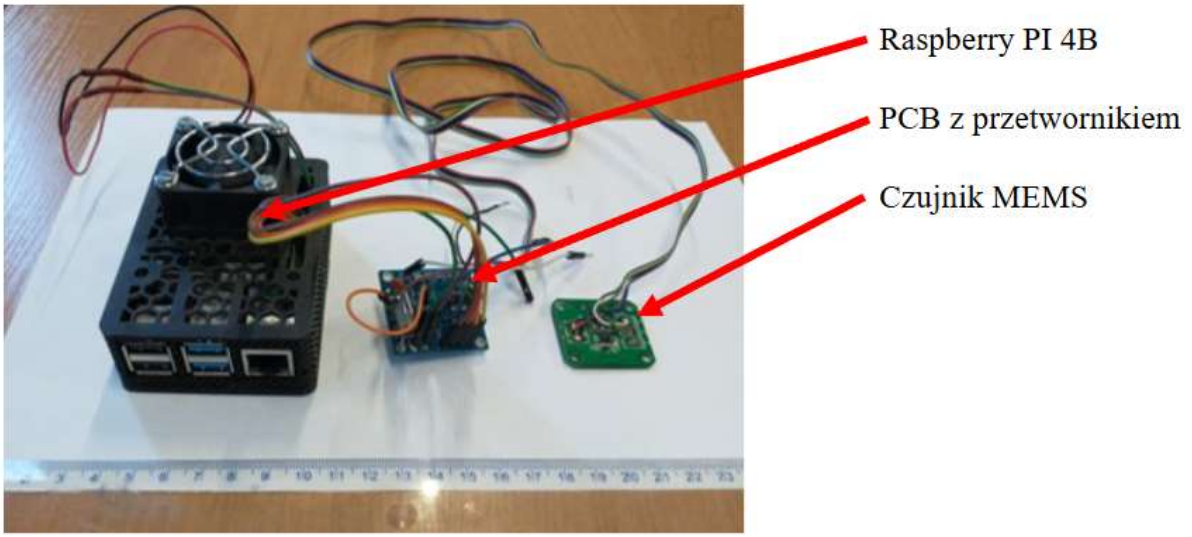


Rys 3.3. Schemat elektroniczny pierwszej wersji płytki

Na rysunku 3.4. przedstawiono prototypowy układ akwizycji danych w konfiguracji testowej. Widoczna jest jednostka centralna Raspberry Pi 4B oraz płytka PCB z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, połączona przewodami sygnałowymi i zasilającymi.

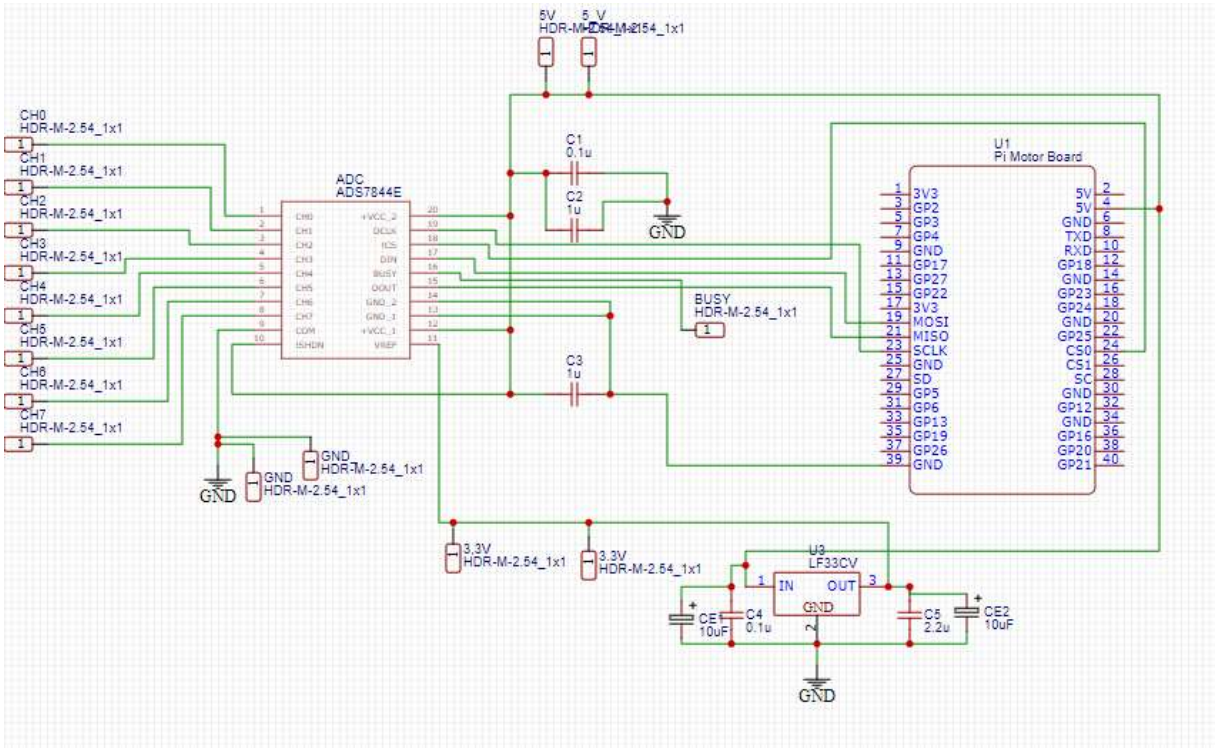
Do wejść przetwornika doprowadzono sygnał z czujnika, co umożliwia jego bezpośrednie próbkowanie i dalsze przetwarzanie w jednostce centralnej.

Układ zrealizowano w formie prototypowej, z zachowaniem dostępu do wszystkich elementów, co umożliwiało prowadzenie testów oraz wprowadzanie modyfikacji w kolejnych etapach projektu.



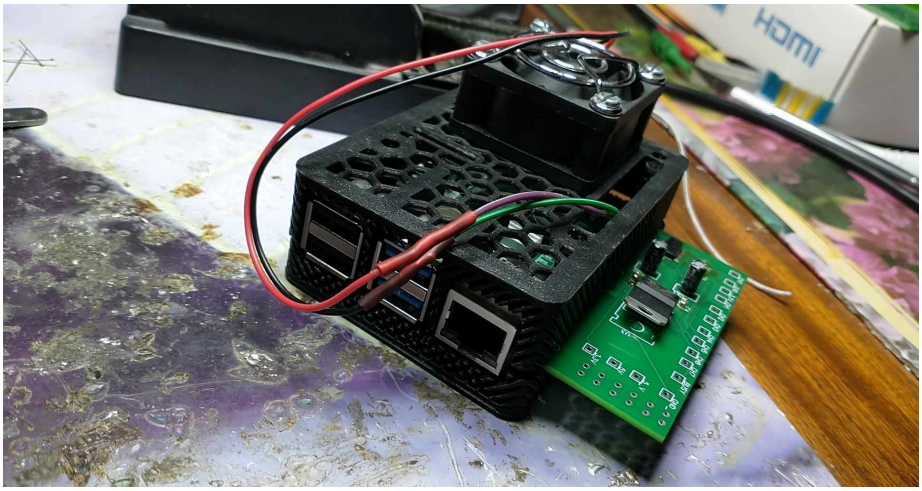
Rys. 3.4. Zdjęcie poglądowe testowej wersji rejestratora

Rozwinięcie układu zostało wykonane w postaci zintegrowanej płytki rozszerzającej typu shield (schemat - Rys. 3.5.), przeznaczonej do bezpośredniego montażu na złączu GPIO minikomputera Raspberry Pi 4B. Takie rozwiązanie eliminuje konieczność stosowania połączeń przewodowych pomiędzy modułami, co upraszcza strukturę układu oraz ogranicza podatność na zakłócenia i błędy połączeń. Na płytce umieszczono przetwornik analogowo-cyfrowy w obudowie QSOP-20 wraz z elementami towarzyszącymi, obejmującymi układy stabilizacji napięcia, filtrację zasilania oraz elementy konfiguracyjne. Integracja tych komponentów na jednej płytce pozwala na zapewnienie spójnych warunków pracy układu oraz ograniczenie wpływu zewnętrznych czynników na jakość sygnału. Płytka została wyposażona w złącza wejściowe umożliwiające bezpośrednie podłączenie czujnika. Linie sygnałowe doprowadzono bezpośrednio do wejść przetwornika, natomiast komunikację z jednostką centralną zrealizowano poprzez interfejs SPI, z wykorzystaniem połączeń dostępnych na złączu GPIO. Zastosowanie zintegrowanej konstrukcji umożliwia powtarzalne warunki pomiarowe, upraszcza konfigurację układu oraz ogranicza wpływ dodatkowych połączeń na tor sygnałowy. Rozwiązanie to stanowi docelową wersję systemu akwizycji danych, przygotowaną do dalszych badań eksperymentalnych.



Rys. 3.5. Schemat elektroniczny dedykowanej płytki rozszerzającej

Na rysunku 3.6. przedstawiono drugą wersję układu akwizycji danych w postaci zintegrowanej płytki rozszerzającej zamontowanej bezpośrednio na złączu GPIO minikomputera Raspberry Pi 4B. Przedstawiona konfiguracja ma charakter poglądowy i pokazuje sposób integracji jednostki centralnej z elementami toru pomiarowego umieszczonymi na płytce rozszerzającej.



Rys. 3.6. Zdjęcie poglądowe ostatecznej wersji mikrokomputera z autorską płytką rozszerzenia

Płytka stanowi kompaktowe rozszerzenie platformy Raspberry Pi i zawiera elementy niezbędne do realizacji toru akwizycji danych, w tym przetwornik analogowo-cyfrowy, układy stabilizacji napięcia, elementy filtrujące oraz złącza do podłączenia czujników. Integracja tych komponentów na jednej płytce eliminuje połączenia przewodowe pomiędzy modułami, co ogranicza wpływ zakłóceń oraz upraszcza konfigurację układu. Złącza umieszczone na krawędzi płytki umożliwiają bezpośrednie doprowadzenie sygnału z czujnika do wejść przetwornika. Całość stanowi zwartą implementację toru pomiarowego przeznaczoną do szybkiej akwizycji danych.



Rys. 3.7. Widok kompletnego systemu rejestratora danych w obudowie zintegrowanej z ekranem dotykowym

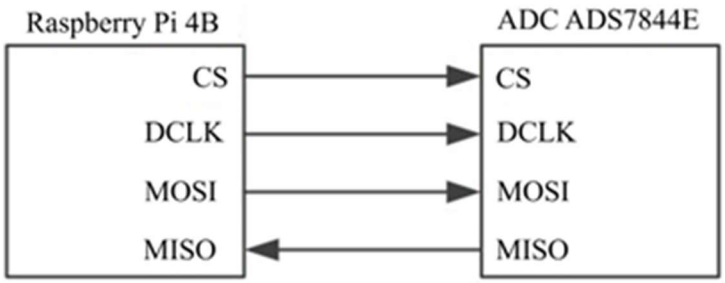
Opracowany system akwizycji stanowi autonomiczny układ pomiarowy przeznaczony do współpracy z czujnikiem MEMS. Układ został zintegrowany w jednej obudowie (Rys. 3.7.), co umożliwia jego wykorzystanie zarówno podczas badań laboratoryjnych, jak i eksperymentów terenowych.

Autorskie oprogramowanie urządzenia umożliwia konfigurację parametrów pomiaru, kontrolę przebiegu rejestracji oraz zapis danych pomiarowych. Zastosowane rozwiązanie pozwala na rejestrację szybkozmiennych sygnałów dynamicznych i ich dalszą analizę poza stanowiskiem pomiarowym.

Komunikacja SPI

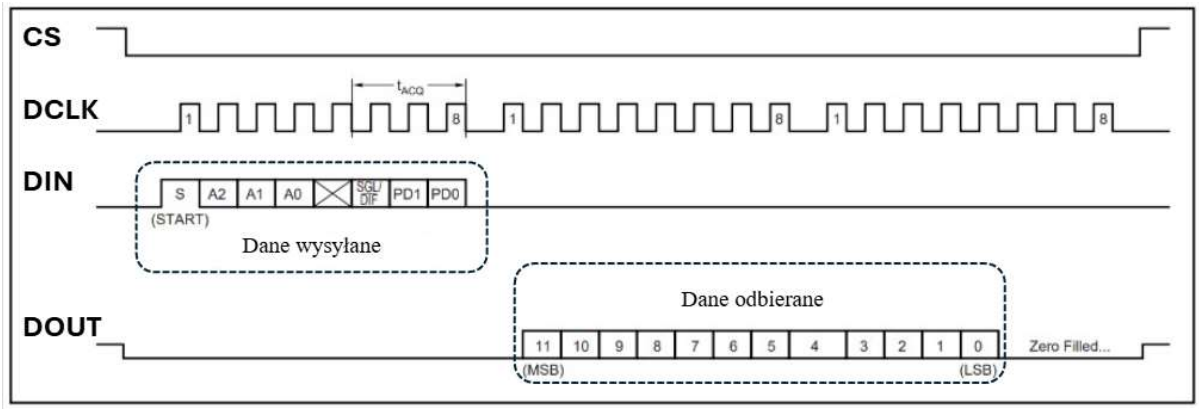
Interfejs komunikacyjny SPI (Rys. 3.8.) pracuje w konfiguracji master-slave. Ze względu na sposób działania zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego transmisja ma charakter sekwencyjny, co odpowiada logicznemu trybowi half-duplex. Linia CS (Chip Select) odpowiada za inicjację transmisji i pozostaje w stanie niskim przez cały czas jej trwania. Transmisja danych synchronizowana jest sygnałem zegarowym DCLK generowanym przez urządzenie nadrzędne (master), którym jest minikomputer Raspberry Pi 4B. Częstotliwość tego sygnału determinuje szybkość przesyłu danych, przy czym jeden bit przesyłany jest w trakcie pojedynczego cyklu zegara. Wymiana danych realizowana jest za pomocą linii DIN i DOUT, które odpowiadają odpowiednio za przesyłanie danych do przetwornika oraz odbiór

danych z przetwornika przez jednostkę centralną. rysunek 3.8. przedstawia uproszczony schemat komunikacji pomiędzy mikrokomputerem a przetwornikiem analogowo-cyfrowym.



Rys. 3.8. Uproszczony schemat komunikacji między rejestratorem (Raspberry Pi 4B) a przetwornikiem ADC

Na rysunku 3.9. przedstawiono przebieg czasowy komunikacji SPI pomiędzy jednostką centralną a przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Ilustracja pokazuje zależności pomiędzy podstawowymi sygnałami magistrali, tj. linią zegarową (DCLK), linią wyboru układu (CS) oraz liniami danych (MOSI i MISO). Zaznaczono kolejne etapy transmisji, obejmujące inicjację komunikacji, przesyłanie komend sterujących oraz odczyt danych pomiarowych. Przedstawiona sekwencja umożliwia określenie wymagań czasowych układu oraz poprawną konfigurację parametrów komunikacji.



Rys. 3.9. Przebieg czasowy komunikacji SPI

W eksperymencie wykorzystano wcześniej omówiony system pomiarowy, oparty na minikomputerze Raspberry Pi 4B oraz przetworniku analogowo-cyfrowym ADS7844E, uzupełniony o zasilacz laboratoryjny generujący napięcie testowe w zakresie 0–3,3 V. Podstawowe parametry techniczne zastosowanego toru akwizycji przedstawiono w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Podstawowe parametry techniczne toru akwizycji danych

Parametr	**Wartość**
Przetwornik A/C	ADS7844E
Rozdzielczość przetwornika	12 bit
Liczba kanałów wejściowych	8
Napięcie zasilania	3,3 [V]
Napięcie odniesienia VREF	3,3 [V]
Zakres napięcia wejściowego	0–3,3 [V]
Interfejs komunikacyjny	SPI
Poziomy logiczne interfejsu	3,3 [V]
Częstotliwość próbkowania	100 kHz
Sygnał zegarowy	DCLK

Przetwornik ADS7844E komunikował się z jednostką centralną za pośrednictwem interfejsu SPI. Połączenia magistrali SPI (DCLK, MISO, MOSI, CS) wykonano zgodnie z dokumentacją przetwornika oraz konfiguracją pinów GPIO Raspberry Pi 4B. Na rysunku 3.10. przedstawiono przebieg komunikacji SPI zarejestrowany za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Widoczne są sekwencje impulsów zegarowych (DCLK) oraz stany linii danych (MOSI/MISO) związane z transmisją kolejnych bajtów. W sygnale

obserwowane są niewielkie zakłócenia występujące pomiędzy kolejnymi transmisjami. Ich obecność w okresach bezczynności wskazuje na możliwość występowania zakłóceń zewnętrznych, związanych między innymi z oddziaływaniem elektromagnetycznym, zasilaniem lub charakterystyką połączeń transmisyjnych. Jednocześnie brak istotnych zakłóceń podczas właściwej transmisji potwierdza poprawność wymiany danych.

.



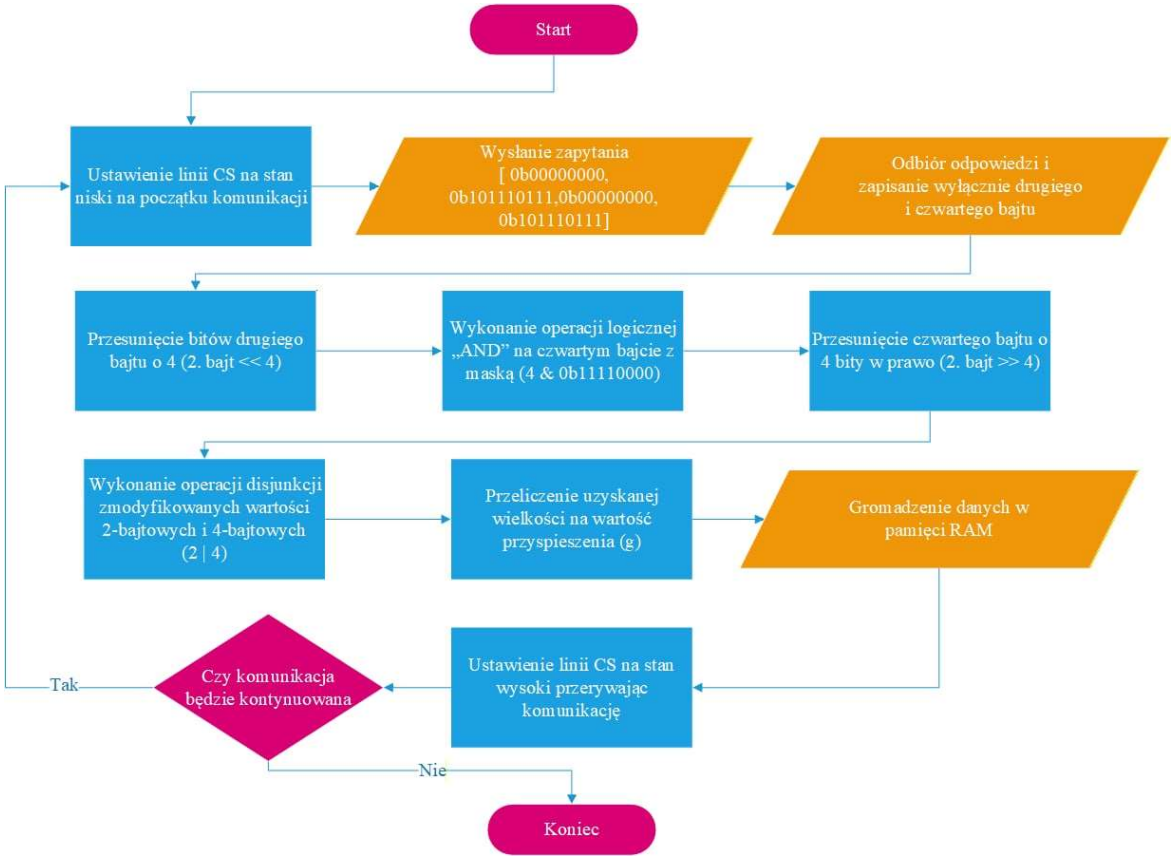
Rys. 3.10. Rejestracja oscyloskopowa pojedynczej sekwencji wymiany danych SPI między mikrokontrolerem a czujnikiem MEMS, ilustrująca relacje czasowe między liniami zegara i danych

Rysunek 3.11. przedstawia przebieg komunikacji w trybie odczytu co drugiego bajtu. W tym wariancie analizowane są wyłącznie fragmenty transmisji zawierające istotne dane pomiarowe, natomiast pozostałe bity są pomijane. Takie podejście pozwala na ograniczenie ilości przetwarzanych danych oraz zwiększenie czytelności zarejestrowanego przebiegu, koncentrując analizę na właściwych wartościach pomiarowych.



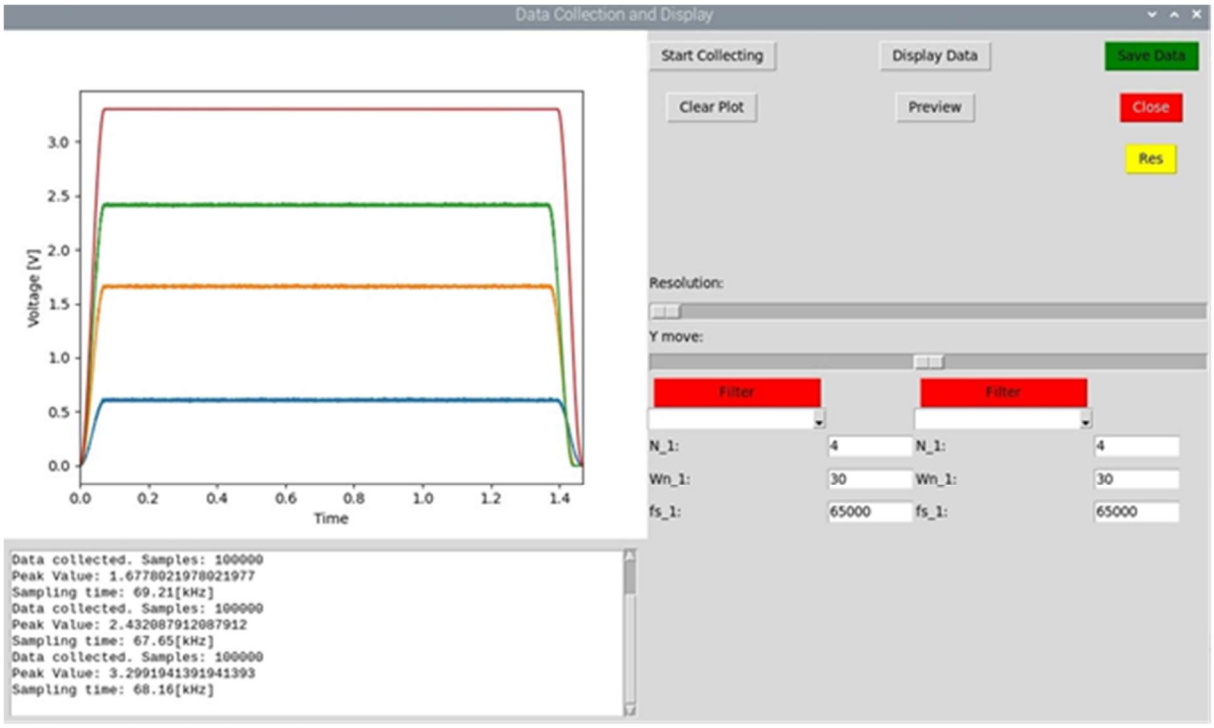
Rys. 3.11. Rejestracja komunikacji SPI za pomocą oscyloskopu w trybie ograniczonego próbkowania (co drugi bajt), pokazująca selektywne pozyskiwanie odpowiednich segmentów danych

W celu ograniczenia wpływu zakłóceń na sygnał pomiarowy zastosowano strategię odbioru co drugiej odpowiedzi z interfejsu SPI. Odebrane dane poddawane są następnie przetwarzaniu z wykorzystaniem maski bitowej, z uwzględnieniem kolejności przesyłu bitów (MSB jako pierwszy). Zakłócenia występujące w trakcie transmisji najbardziej znaczącego bitu mogą prowadzić do błędu rzędu 50% zakresu pomiarowego. Zastosowany algorytm pozwala na ograniczenie wpływu tego typu błędów poprzez pomijanie niepewnych próbek oraz selektywną analizę danych. Dodatkowo wykorzystanie maski bitowej umożliwia wstępną korekcję danych na etapie ich rejestracji, co zwiększa odporność systemu na błędy transmisji. Pomimo uproszczonej procedury przetwarzania, uzyskano stabilną częstotliwość próbkowania na poziomie około 100 kHz. Schemat algorytmu przetwarzania pojedynczego pakietu danych przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Schemat blokowy algorytmu transmisji, odbioru i przetwarzania danych w systemie pomiarowym

W ramach wstępnych testów przeprowadzono pomiar napięcia stałego z zasilacza laboratoryjnego, przyłożonego do jednego z wejść analogowych przetwornika ADS7844E. Celem badania była weryfikacja poprawności działania toru pomiarowego oraz ocena dokładności konwersji sygnału analogowego na postać cyfrową. Napięcie zasilacza ustawiono na kilku poziomach (0,6 V, 1,65 V, 2,4 V, 3,3 V), w tym odpowiadających zakresowi pracy czujnika wykorzystywanego w dalszej części projektu. Odczyt danych z przetwornika zrealizowano w języku Python z wykorzystaniem biblioteki *spidev* do obsługi magistrali SPI. Surowe wartości cyfrowe przeskalowano do odpowiadających im wartości napięcia, a następnie porównano z wynikami pomiarów wykonanych równolegle za pomocą multimetru w celu oceny dokładności przetwarzania.



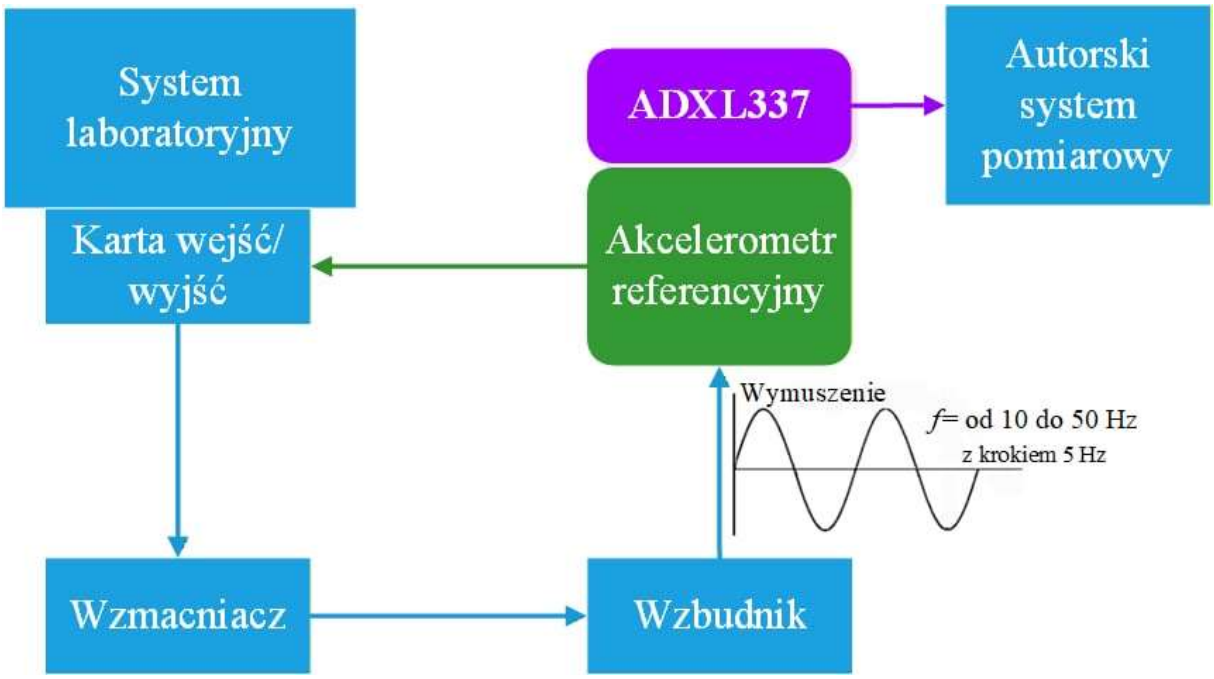
Rys. 3.13. Zrzut ekranu graficznego interfejsu użytkownika (GUI) ilustrujący test komunikacji SPI między modułem ADC a mikrokomputerem

Przedstawiony wykres (Rys. 3.13.) prezentuje odczyty napięcia zarejestrowane przez przetwornik ADS7844E. Uzyskane wartości wykazują dobrą zgodność z napięciami referencyjnymi, co potwierdza poprawność działania toru pomiarowego. Zarejestrowane sygnały charakteryzują się stabilnym przebiegiem, a odchylenia mieszczą się w dopuszczalnym zakresie błędu pomiarowego. Obserwowane niewielkie fluktuacje wynikają głównie z zakłóceń zasilania. Zniekształcenia widoczne na początku i końcu przebiegu związane są z działaniem algorytmu filtrującego oraz ograniczeniami wynikającymi z częstotliwości próbkowania. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność opracowanego układu do dalszych badań eksperymentalnych.

Testy systemu pomiarowego

W kolejnym etapie badań przeanalizowano odpowiedź dynamiczną czujnika MEMS w warunkach kontrolowanego wymuszenia harmonicznego. Eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska wyposażonego we wzbudnik elektromagnetyczny, umożliwiający generowanie drgań o zadanych częstotliwościach

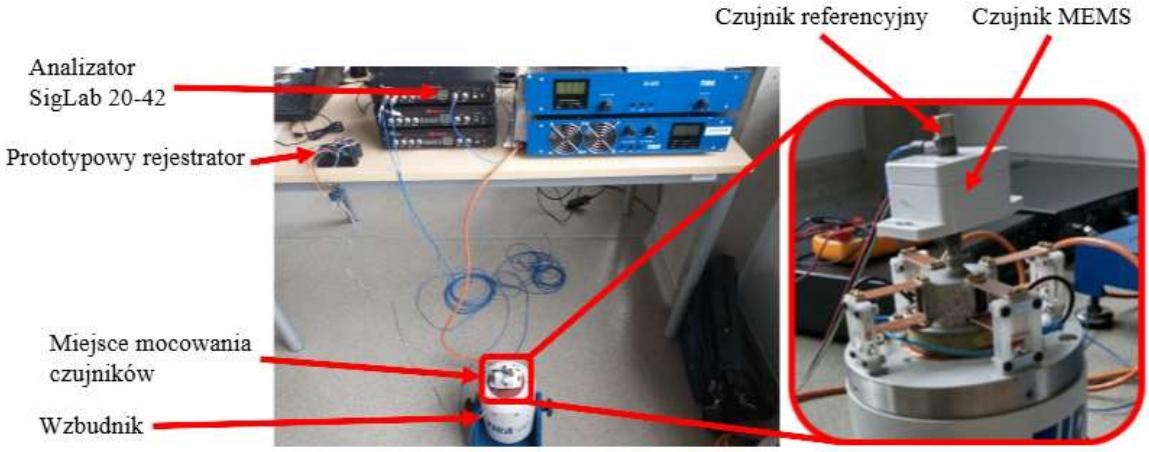
i amplitudach. W układzie pomiarowym, oprócz badanego czujnika MEMS, zastosowano dwa referencyjne akcelerometry piezoelektryczne typu ICP firmy PCB. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie odpowiedzi czujnika MEMS z sygnałem odniesienia oraz ocenę jego charakterystyki dynamicznej. Zarejestrowane dane posłużyły do oceny właściwości czujnika w zakresie pomiaru drgań oraz identyfikacji parametrów dynamicznych.



Rys. 3.14. Uproszczony schemat toru pomiarowego

Na rysunku 3.14. przedstawiono uproszczony schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do analizy odpowiedzi dynamicznej czujnika MEMS w warunkach wymuszenia harmonicznego. System sterowania i akwizycji oparto na środowisku MATLAB współpracującym z kartą pomiarową MTS DSP SigLab 20-42, zapewniającą rejestrację sygnałów z częstotliwością próbkowania do 20 kHz na kanał. Karta generuje sygnał sinusoidalny o zadanych parametrach, który po wzmocnieniu przekazywany jest do wzbudnika elektrodynamicznego TIRA. Wymuszenie mechaniczne przenoszone jest na platformę pomiarową, na której zamontowano badane czujniki. Wzbudnik TIRA charakteryzował się zakresem częstotliwości 2–7000 Hz, maksymalną siłą wymuszającą 75 N, maksymalnym przyspieszeniem 51 g oraz maksymalnym przemieszczeniem 10 mm. Na platformie zainstalowano dwa referencyjne

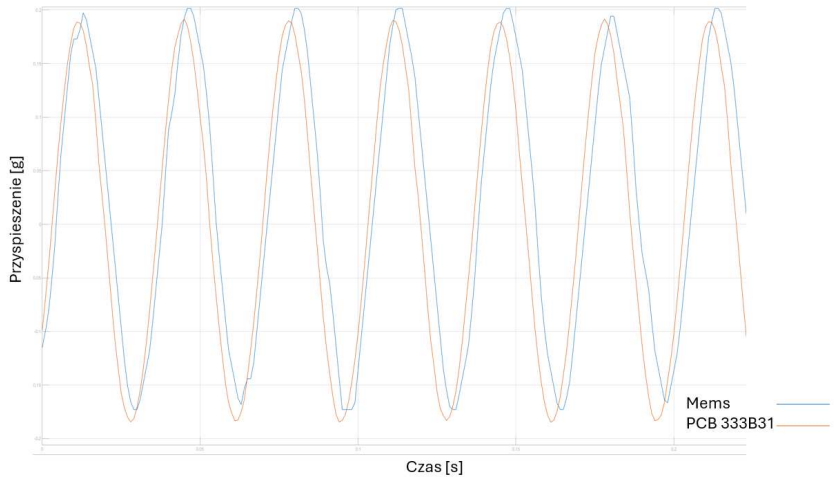
akcelerometry piezoelektryczne PCB 333B31 oraz PCB 352C33, podłączone bezpośrednio do karty pomiarowej, oraz czujnik MEMS współpracujący z autorskim systemem akwizycji danych. Dla akcelerometru PCB 333B31 zastosowano zakres pomiarowy ±50 g oraz pasmo częstotliwości 0,5–3000 Hz, natomiast dla PCB 352C33 zakres pomiarowy ±50 g oraz pasmo częstotliwości 0,5–10000 Hz**].** Taka konfiguracja (Rys. 3.15) umożliwia jednoczesną rejestrację sygnałów z trzech kanałów pomiarowych oraz bezpośrednie porównanie odpowiedzi czujnika MEMS z sygnałami referencyjnymi.



Rys. 3.15. Realizacja stanowiska pomiarowego

Przeprowadzony eksperyment ma celu ocenę odpowiedzi dynamicznej czujnika MEMS w warunkach wymuszenia harmonicznego. Pomiar realizowano równolegle z wykorzystaniem dwóch referencyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych typu PCB, co umożliwiło bezpośrednie porównanie sygnałów oraz weryfikację poprawności działania czujnika MEMS.

Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi zarejestrowane podczas jednego z testów. Analiza danych umożliwia ocenę zgodności amplitudowej i czasowej sygnałów oraz identyfikację różnic wynikających z charakterystyki zastosowanych czujników.



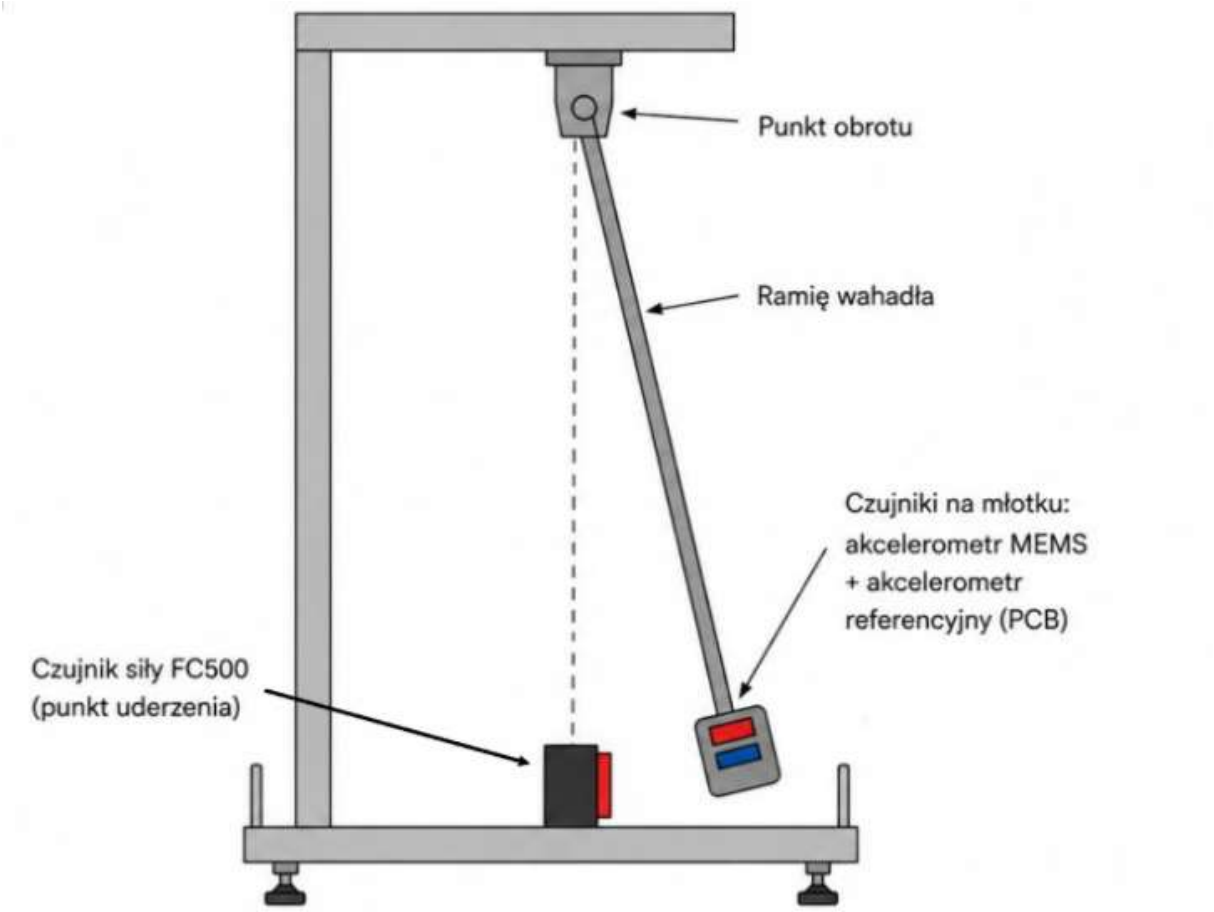
Rys. 3.16. Porównanie sygnałów przyspieszenia zarejestrowanych przez czujnik MEMS i akcelerometry referencyjne w funkcji czasu

Przedstawiony wykres (Rys. 3.16.) prezentuje przykładowy przebieg sygnału zarejestrowanego podczas jednej z serii pomiarowych przeprowadzonych w ramach eksperymentu dynamicznego. Badania miały na celu ocenę odpowiedzi czujnika MEMS na wymuszenia harmoniczne generowane przez wzbudnik elektrodynamiczny. Zakres częstotliwości obejmował przedział od 10 Hz do 50 Hz, z krokiem co 5 Hz, co umożliwiło analizę odpowiedzi układu w istotnym zakresie dynamicznym. W każdej serii rejestrowano dane z trzech kanałów pomiarowych: dwóch referencyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych (PCB) oraz czujnika MEMS współpracującego z autorskim systemem akwizycji danych. Taka konfiguracja umożliwiła bezpośrednie porównanie sygnałów oraz ocenę zgodności amplitudowej i czasowej odpowiedzi czujnika MEMS względem czujników referencyjnych. Pozyskane dane eksperymentalne wykorzystano nie tylko do celów porównawczych, ale również jako dane wejściowe do walidacji modelu numerycznego odwzorowującego zachowanie układu mechanicznego oraz charakterystykę czujnika MEMS. Takie podejście umożliwia dopasowanie parametrów modelu do rzeczywistych warunków dynamicznych oraz ocenę jego zgodności z wynikami pomiarów.

Test systemu pomiarowego z użyciem wahadła

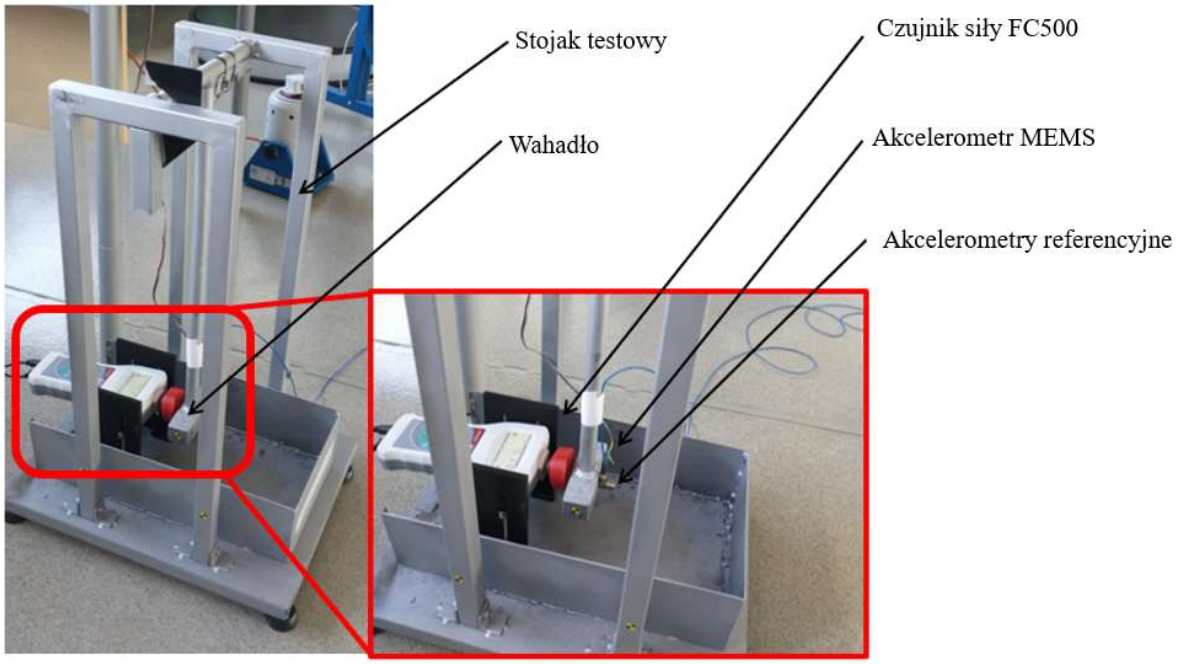
Wahadło fizyczne stanowi układ mechaniczny, w którym ciało sztywne wykonuje ruch oscylacyjny pod wpływem siły grawitacji wokół osi nieprzechodzącej przez jego środek

masy. W odróżnieniu od idealnego wahadła matematycznego uwzględnia ono rzeczywisty rozkład masy oraz geometrię układu. Schemat zastosowanego układu wahadłowego przedstawiono na rysunku 3.17.



Rys. 3.17. Schemat układu wahadłowego

W przeprowadzonym eksperymencie wykorzystano wahadło fizyczne do wygenerowania impulsowego wymuszenia mechanicznego poprzez uderzenie młotka wahadła w czujnik siły. Na elemencie uderzającym zamontowano badany akcelerometr MEMS oraz referencyjne akcelerometry piezoelektryczny, co umożliwiło jednoczesną rejestrację odpowiedzi wszystkich czujników na to samo wymuszenie. Sygnał z czujnika MEMS rejestrowano za pomocą autorskiego systemu akwizycji danych opartego na mikrokomputerze Raspberry Pi 4B i interfejsie SPI, natomiast sygnały z czujników referencyjnych rejestrowano za pomocą laboratoryjnego toru pomiarowego. Na rysunku 3.18. przedstawiono rzeczywistą realizację stanowiska badawczego.



Rys. 3.18. Układ eksperymentalny z fizycznym wahadłem i zamontowanymi czujnikami, w tym czujnikiem siły w punkcie uderzenia, akcelerometrem MEMS i referencyjnymi czujnikami przyspieszenia

Podczas eksperymentu wahadło uwalniano z dwóch położeń początkowych. W najniższym punkcie trajektorii następował kontakt końcówki wahadła z czujnikiem siły FC500 (AXIS Sp. z o.o., Polska), umożliwiający pomiar wartości siły uderzenia. Rejestrację danych prowadzono równocześnie w trzech niezależnych torach pomiarowych: torze czujnika siły, torze akcelerometru MEMS ADXL377 współpracującego z mikrokomputerem Raspberry Pi 4B oraz torze referencyjnym opartym na analizatorze sygnałów dynamicznych MTS DSP SigLab 20-42 i akcelerometrach piezoelektrycznych PCB Piezotronics (modele 333B31 oraz 352C33). Synchronizacja czasowa wszystkich kanałów pomiarowych umożliwiła bezpośrednie porównanie zarejestrowanych sygnałów oraz ocenę ich zgodności. Pomiary wykorzystano do kalibracji systemu akwizycji danych oraz weryfikacji jakości odczytu sygnału z czujnika MEMS w warunkach impulsowego obciążenia dynamicznego.

Badania przeprowadzono dla dwóch kątów wychylenia wahadła: 20° oraz 40°. Dla każdego położenia początkowego wykonano 30 niezależnych pomiarów.

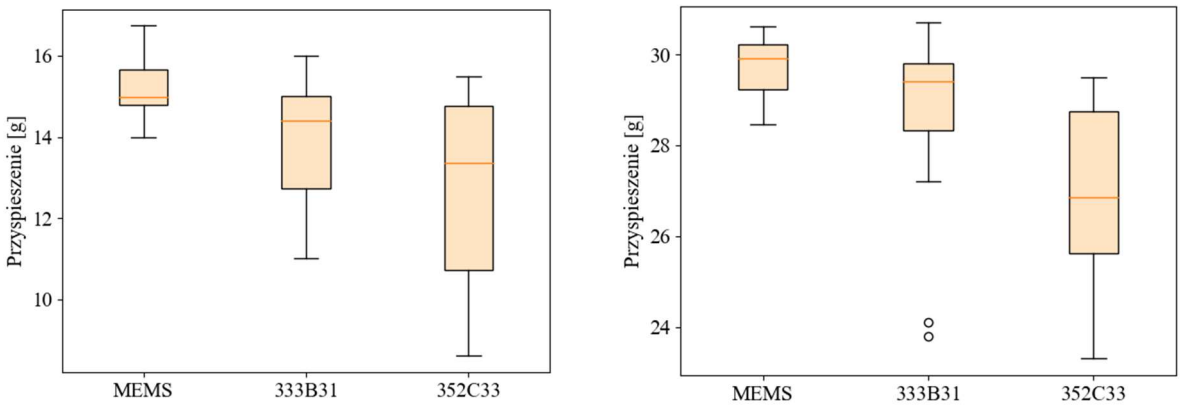
W każdym przypadku po zwolnieniu wahadła następowało uderzenie w czujnik siły zamocowany w punkcie pomiarowym. Na podstawie zarejestrowanego sygnału wyznaczano maksymalną wartość siły uderzenia. Równocześnie rejestrowano przyspieszenia
za pomocą akcelerometru MEMS współpracującego z systemem opartym na Raspberry Pi oraz referencyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych podłączonych do analizatora MTS DSP SigLab 20-42. Wyniki 30 kolejnych pomiarów dla obu kątów wychylenia zestawiono w Tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Wartości wielkości mierzonych podczas eksperymentu

	FC500		MEMS		333B31		352C33	
Kąt wychylenia	20°	40°	20°	40°	20°	40°	20°	40°
	72.60	155.50	15.17	28.85	12.80	24.10	10.70	23.30
	75.30	156.50	14.39	28.46	12.70	23.80	10.40	23.80
	79.90	150.20	15.76	28.85	15.20	27.40	14.40	24.90
	78.60	151.80	16.15	29.82	14.30	29.90	14.60	29.00
	76.60	152.70	14.78	29.24	14.70	29.80	14.00	29.50
	75.10	151.80	14.98	28.85	14.50	29.10	14.70	28.80
	74.00	153.80	14.98	29.24	12.90	30.00	12.60	28.60
	78.40	155.00	16.54	30.02	14.20	30.70	12.10	28.80
	74.70	154.90	14.78	29.63	15.00	30.50	14.80	29.50
	73.30	154.20	14.00	29.82	11.10	30.00	9.50	29.50
	75.00	155.10	14.98	30.61	14.60	30.70	14.50	29.50
	77.00	153.30	14.98	30.00	14.40	29.00	12.60	27.70
	74.00	153.80	14.59	30.02	11.10	29.50	8.60	28.80
	77.10	151.60	16.74	29.24	15.50	29.00	15.10	27.90
	75.90	154.40	14.78	30.41	14.70	29.80	14.30	28.30
	74.00	153.00	15.37	29.24	13.00	29.40	11.00	28.00
	74.00	153.60	14.78	29.24	14.70	29.10	14.50	25.70
	76.10	154.20	14.78	29.63	14.40	28.60	12.70	25.60
	77.30	154.80	15.37	30.41	12.00	29.50	10.80	27.50
	77.20	154.30	15.95	30.02	11.20	29.40	9.00	26.20
	77.40	154.30	14.98	29.63	13.90	29.40	11.70	26.10
	82.50	155.30	16.15	30.22	15.40	29.90	15.50	26.60
	75.40	153.40	15.37	30.41	15.00	29.40	15.00	26.30
	77.30	154.40	15.95	30.60	11.00	29.60	8.90	26.10
	75.20	155.10	14.39	30.20	15.50	28.40	15.00	26.20
	75.80	153.40	14.78	30.41	11.30	28.30	8.70	27.10
	76.30	154.20	14.78	30.20	16.00	27.60	15.20	25.40

	75.60	154.30	15.95	29.20	11.30	27.50	10.00	25.50
	75.60	154.70	14.78	30.41	15.50	27.20	14.90	23.60
	76.10	155.40	15.17	30.02	15.60	28.00	15.30	25.20
$\bar{x}$	76.11	153.97	15.21	29.76	13.78	28.82	12.70	26.97
σ	2.03	1.34	0.67	0.60	1.63	1.62	2.37	1.86
CV	2.66%	0.87%	4.38%	2.01%	11.85%	5.64%	18.68%	6.91%

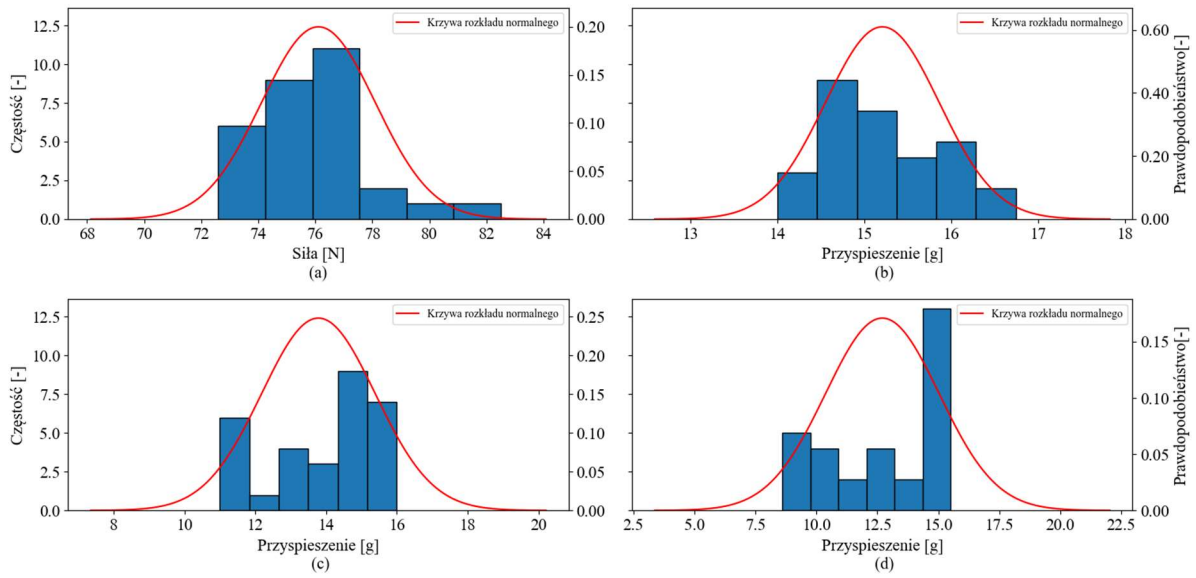
Najmniejsze zróżnicowanie wartości w serii 30 kolejnych pomiarów odnotowano dla czujnika siły FC500, co potwierdza współczynnik zmienności nieprzekraczający 3%. Niską zmiennością wyników charakteryzowały się również dane zarejestrowane przy użyciu systemu z akcelerometrem MEMS, dla którego współczynnik zmienności nie przekraczał 5%. Dane z czujnika MEMS wykazywały jednocześnie najniższe odchylenie standardowe spośród wszystkich analizowanych akcelerometrów, pomimo że średnia wartość szczytowego przyspieszenia była w tym przypadku najwyższa. Największe zróżnicowanie wyników odnotowano dla akcelerometrów piezoelektrycznych, w szczególności dla czujnika 352C33, dla którego współczynnik zmienności osiągał wartości bliskie 20%. W analizowanym zbiorze danych dla tego czujnika występowały powtarzające się wartości wyraźnie niższe od pozostałych wyników, w tym wartości poniżej 9 g. Średnia wartość przyspieszenia zarejestrowana przez czujnik 352C33 wynosiła 12,70 g. Dla kąta wychylenia wahadła wynoszącego 40° wartości zarejestrowane przez wszystkie czujniki wzrosły wraz ze zwiększeniem wartości wymuszenia. Charakter zmienności wyników pozostał zbliżony do obserwowanego dla kąta 20°, przy czym ponownie najniższy współczynnik zmienności odnotowano dla czujnika siły (poniżej 1%), a porównywalnie niską zmienność uzyskano dla czujnika MEMS (nieco powyżej 2%). W przypadku akcelerometrów piezoelektrycznych zróżnicowanie wyników nadal było największe, jednak wyraźnie mniejsze niż dla kąta 20° i nie przekraczało 7%. Obserwowane zmniejszenie współczynnika zmienności przy większym kącie wychylenia może być związane ze zwiększeniem amplitudy rejestrowanego sygnału, co prowadzi do korzystniejszego stosunku wartości sygnału do poziomu zakłóceń pomiarowych. W celu zobrazowania rozkładu wyników dla poszczególnych akcelerometrów na rysunku 3.19. przedstawiono graficzne zestawienie rozkładu wyników pomiarowych dla obu analizowanych przypadków (20° i 40°).



(a) (b)

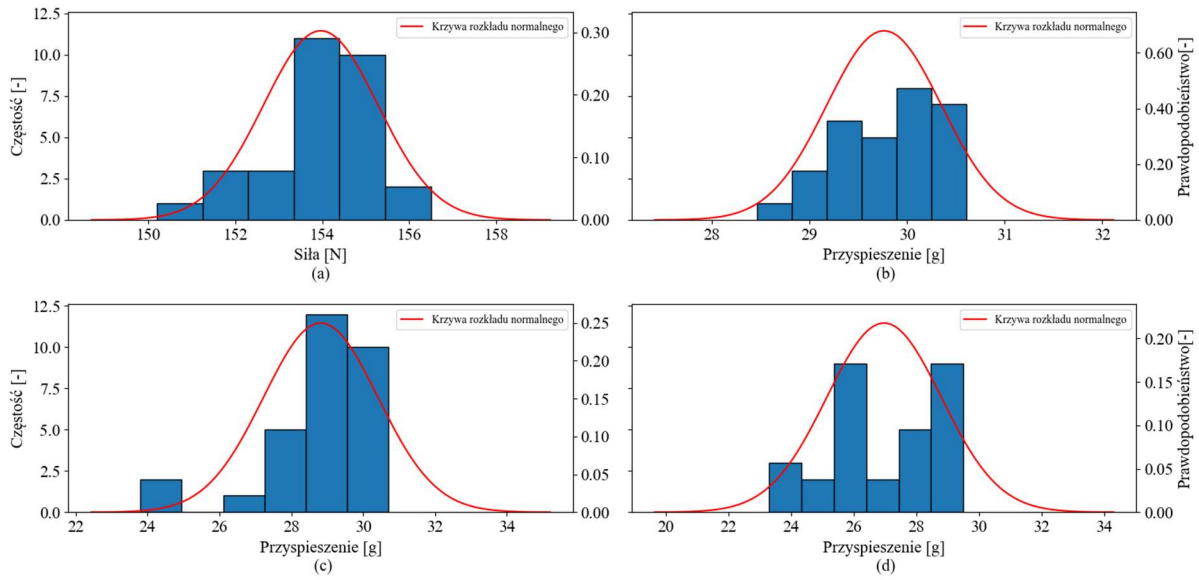
Rys. 3.19. Wykres rozkładu wartości przedstawiający porównanie wyników pomiarów poszczególnych urządzeń podczas uderzenia dla a) 20° b) 40°

Na wykresach przedstawiono graficzne zestawienie rozkładu analizowanych wyników pomiarowych. Na podstawie przedstawionych danych można zauważyć, że wartości zarejestrowane przez akcelerometr MEMS są wyższe niż w przypadku pozostałych czujników, co potwierdza najwyższa wartość mediany. Różnica ta może być związana między innymi z wyższą częstotliwością próbkowania systemu opartego na czujniku MEMS, która pozwala na dokładniejsze odwzorowanie przebiegu krótkotrwałego impulsu i ogranicza ryzyko pominięcia jego wartości maksymalnej. Na przedstawionych rozkładach widoczne jest przesunięcie mediany względem środka zakresu, wskazujące na asymetrię rozkładów analizowanych danych. W celu dokładniejszej oceny charakteru rozkładów na rysunkach 3.20. i 3.21. przedstawiono histogramy danych dla kątów wychylenia wynoszących odpowiednio 20° i 40°.



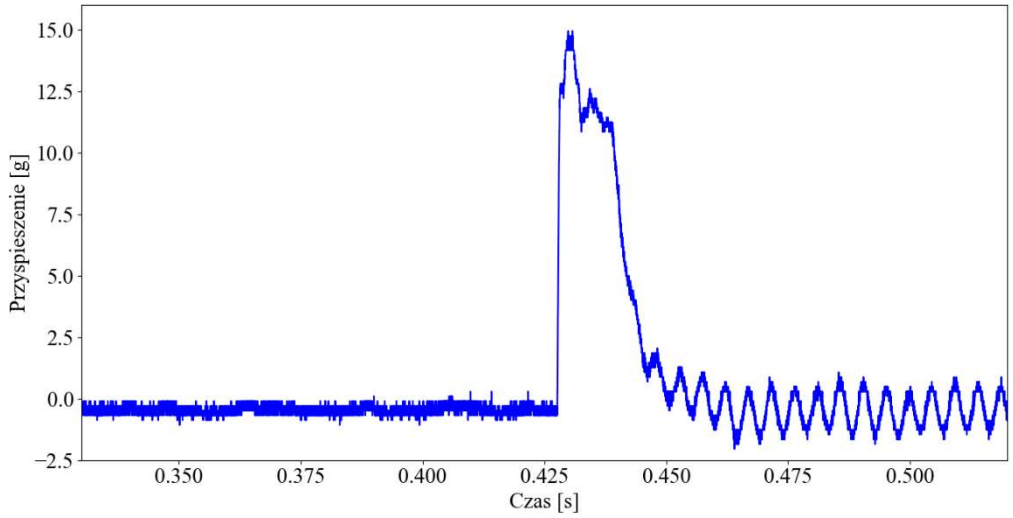
Rys. 3.20. Histogramy przedstawiające rozkład wyników pomiarów dla różnych urządzeń z krzywą rozkładu normalnego określoną na podstawie średniej z próby i odchylenia standardowego przy uderzeniu pod kątem 20°. Histogramy przedstawiono kolejno dla (a) czujnika siły FC500, (b) akcelerometru typu MEMS, (c) czujnika piezoelektrycznego 333B31, (d) czujnika piezoelektrycznego 352C33

Na histogramach, w celu oceny charakteru rozkładów, nałożono krzywe rozkładu normalnego wyznaczone na podstawie średniej oraz odchylenia standardowego dla poszczególnych zestawów danych. Przedstawione wyniki wskazują na asymetryczny charakter rozkładów dla wszystkich analizowanych czujników. W przypadku czujnika siły FC500 oraz akcelerometru MEMS rozkłady wykazują jednak częściowe podobieństwo do rozkładu normalnego, co sugeruje możliwość ich aproksymacji przy większej liczbie próbek. Odmienny charakter obserwuje się dla akcelerometrów piezoelektrycznych, dla których rozkłady cechują się wyraźną asymetrią oraz zwiększoną częstością występowania wartości skrajnych. Zjawisko to najprawdopodobniej wynika z ograniczeń pomiarowych tych czujników, polegających na niepełnym odwzorowaniu wartości maksymalnych w trakcie impulsu. W konsekwencji jako wartości szczytowe rejestrowane są próbki poprzedzające lub następujące po rzeczywistym maksimum, co prowadzi do zaniżenia zarejestrowanych przyspieszeń.



Rys. 3.21. Histogramy przedstawiające rozkład wyników pomiarów dla różnych urządzeń z krzywą rozkładu normalnego określoną na podstawie średniej z próby i odchylenia standardowego przy uderzeniu pod kątem 40°. Histogramy są przedstawione kolejno dla (a) czujnika siły FC500, (b) akcelerometru typu MEMS, (c) czujnika piezoelektrycznego 333B31, (d) czujnika piezoelektrycznego 352C33

Rozkład danych dla uderzenia przy kącie wychylenia wahadła wynoszącym 40° jest zbliżony do obserwowanego dla kąta 20°. Wyjątek stanowią dane zarejestrowane przez akcelerometr piezoelektryczny 333B31, dla którego rozkład w większym stopniu przypomina rozkład normalny. Jednocześnie w tym przypadku obserwuje się występowanie pojedynczych wyników wyraźnie odbiegających od pozostałych obserwacji, co widoczne jest jako przerwy w ciągłości histogramu. W klasycznej analizie pomiarowej tego typu wyniki mogłyby zostać odrzucone jako błędy pomiarowe. W niniejszej pracy stanowią one jednak istotny element porównania metod pomiarowych, ponieważ ich występowanie może wskazywać na ograniczenia stosowanych czujników. Obserwowane różnice mogą być związane między innymi z niewystarczającym dopasowaniem częstotliwości próbkowania do charakteru krótkotrwałego impulsu, co może prowadzić do niepełnego odwzorowania jego wartości maksymalnej. Istotnym aspektem oceny pozostaje również jakość odwzorowania przebiegu czasowego sygnału. W celu jej zobrazowania na rysunku 3.22. przedstawiono przebieg przyspieszenia podczas uderzenia dla kąta wychylenia 20°.



.

Rys. 3.22. Przebieg przyspieszenia podczas uderzenia młotka przy odchyleniu wahadła wynoszącym 20°

Zarejestrowany przebieg wskazuje, że autorski system akwizycji danych umożliwia uchwycenie wartości maksymalnego przyspieszenia występującego podczas impulsu oraz określenie czasu jego trwania. W dalszej części przebiegu widoczne są również oscylacje przyspieszenia występujące po zakończeniu impulsu, które zostały zarejestrowane przez system pomiarowy.

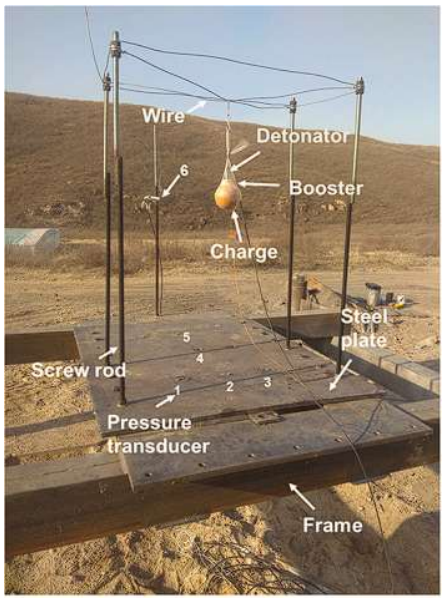
4. Badania eksperymentalne i numeryczne oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu

4.1 Badania eksperymentalne

W dalszej części rozdziału przedstawiono badania eksperymentalne przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanego systemu akwizycji danych oraz stanowiska badawczego. Badania miały na celu weryfikację poprawności działania układu oraz ocenę możliwości rejestracji sygnałów z czujnika MEMS podczas dynamicznych wymuszeń mechanicznych. Uzyskane wyniki wykorzystano do oceny jakości działania systemu pomiarowego oraz porównania odpowiedzi czujnika MEMS z sygnałami uzyskanymi za pomocą czujników referencyjnych. W kolejnych podsekcjach przedstawiono konfigurację stanowiska, metodykę badań oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów.

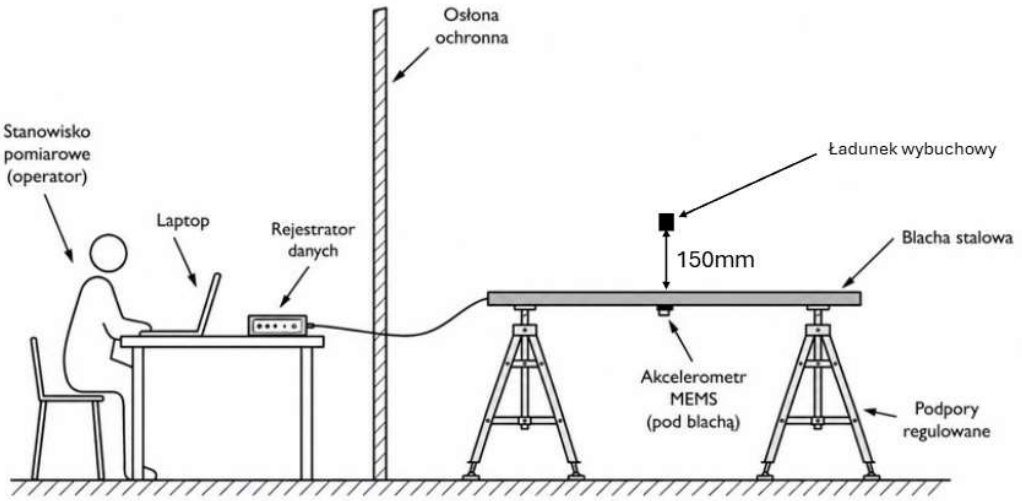
Stanowisko do badań

Postać stanowiska badawczego oraz metodyki badawcze opracowano na podstawie analizy literatury w zakresie badań oddziaływań wybuchowych oraz propagacji fal uderzeniowych w materiałach konstrukcyjnych. W analizowanych pracach często stosuje się układy z zawieszonym ładunkiem wybuchowym (Rys. 4.1.), umożliwiające badanie odpowiedzi dynamicznej elementów, takich jak płyty stalowe, na impulsowe obciążenie ciśnieniowe oraz rejestrację sygnałów związanych z ich dynamiczną odpowiedzią.



Rys. 4.1. Eksperyment opisany w literaturze [64]

W analizowanym przypadku zastosowano sztywno zamocowaną stalową płytę, na którą oddziałuje impuls ciśnienia. Po środku, na wysokości 150 mm nad płytą, zawieszono ładunek wybuchowy, co umożliwia swobodne rozwinięcie frontu fali uderzeniowej oraz zapewnia powtarzalność warunków inicjacji. Przyjęta konfiguracja geometryczna – płyta poniżej oraz zawieszony nad nią ładunek – odpowiada układom stosowanym w badaniach terenowych i poligonowych, umożliwiając analizę wpływu obciążenia wybuchowego na badany element.



Rys. 4.2. Schemat stanowiska badawczego do badań oddziaływania fali wybuchu

Na rysunku 4.2. przedstawiono schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do rejestracji odpowiedzi dynamicznej konstrukcji poddanej oddziaływaniu fali wybuchu. Głównym elementem stanowiska jest stalowa płyta zamocowana na regulowanych podporach, pod którą umieszczono badany akcelerometr MEMS. Sygnał z czujnika był przekazywany przewodem do rejestratora danych zlokalizowanego w pobliżu stanowiska pomiarowego. Aparaturę pomiarową oraz operatora umieszczono za osłoną ochronną, ograniczającą ryzyko oddziaływania odłamków i innych zagrożeń związanych z przeprowadzaniem eksperymentów. Schemat przedstawia wzajemne rozmieszczenie podstawowych elementów stanowiska oraz toru rejestracji danych.



Rys. 4.3. Widok stanowiska badawczego

Na zdjęciu (Rys. 4.3.) przedstawiono fizyczną realizację stanowiska do badań wybuchowych, w której zamiast dedykowanego stojaka zastosowano dodatkowy zestaw podpór o stałej wysokości. Badany element umieszczono na spawanej, sztywnej ramie, stabilnie opartej na tych podporach. Przyjęte rozwiązanie zapewnia odpowiednią sztywność układu oraz umożliwia montaż ładunku (wyrób pirotechniczny kategorii F3, przeznaczony do użytku konsumenckiego na otwartej przestrzeni) nad badaną strukturą bez konieczności stosowania dodatkowych elementów konstrukcyjnych. Adaptacja stanowiska pozwala na elastyczne dostosowanie konfiguracji do różnych wariantów eksperymentalnych.



Rys. 4.4. Zamocowanie ładunku nad badanym obiektem

Na zdjęciach (Rys. 4.4) przedstawiono sposób montażu ładunku wybuchowego na profilu nośnym zamocowanym na podporach stanowiska. Profil umożliwia stabilne zamocowanie ładunku oraz jego pozycjonowanie względem badanej powierzchni. Zastosowany kątownik pomiarowy stanowi punkt odniesienia podczas ustawiania położenia ładunku, ułatwiając zachowanie powtarzalnej wysokości jego zamocowania względem powierzchni płyty. Na przedstawionym stanowisku zachowano odległość 150 mm pomiędzy ładunkiem a powierzchnią badanego elementu. Przyjęcie stałej wartości tego parametru pozwala ograniczyć wpływ zmian geometrii stanowiska na wyniki kolejnych eksperymentów.

Badania terenowe – seria I

W podrozdziale przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych podczas badań z wykorzystaniem ładunków wybuchowych. W pierwszej serii pomiarowej przeanalizowano sygnały zarejestrowane za pomocą autorskiego systemu akwizycji danych oraz odpowiedź dynamiczną badanej struktury.



Rys 4.5. Zrzut ekranu z autorskiego rejestratora

Na rysunku 4.5. przedstawiono przykładowy przebieg sygnału zarejestrowanego przez czujnik MEMS przy użyciu autorskiego systemu akwizycji danych. Rejestracja oraz wizualizacja sygnału odbywały się w opracowanym środowisku programistycznym, umożliwiającym podgląd danych w czasie rzeczywistym. Zaprezentowany przebieg ilustruje dynamiczną odpowiedź czujnika na impulsowe wymuszenie mechaniczne, potwierdzając poprawne działanie zarówno warstwy sprzętowej, jak i programowej systemu.

Tabela 4.1. Wyniki pomiarów przyspieszenia

Lp.	MEMS [g]	Lp.	MEMS [g]	Lp.	MEMS [g]
1	32,96	11	24,56	21	30,3
2	22,01	12	26,7	22	41,1
3	24,95	13	43,3	23	29,3
4	18,89	14	23	24	24,74
5	26,51	15	26,7	25	25,22
6	18,3	16	10,5	26	26,8
7	24,56	17	36,08	27	28,6
8	24,75	18	32,96	28	32,2
9	31,4	19	26,84	29	34,1
10	25,14	20	29,5	30	22,99

Parametr	Wartość
Odchylenie standardowe [g]	**6,529549**
Średnia [g]	**27,49867**
Współczynnik zmienności	**0,23745**

Tabela 4.1. przedstawia wyniki pierwszego eksperymentu, w którym rejestrowano odpowiedź czujnika MEMS na impulsowe oddziaływanie dynamiczne w kontrolowanych warunkach polowych. Pomiary obejmują 30 kolejnych prób, dla których wyznaczono maksymalne wartości przyspieszenia wyrażone w jednostkach g (1 g = 9,81 m/s²).

Dla analizowanego zestawu danych obliczono podstawowe statystyki opisowe:

- **Średnia wartość amplitudy**: 27,50 g,
- **Odchylenie standardowe**: 6,53 g,
- **Współczynnik zmienności**: 0,238 (23,8%).

Uzyskane wyniki wskazują na względnie stabilną, choć umiarkowanie rozproszoną odpowiedź czujnika MEMS. Obserwowane zróżnicowanie może wynikać z niewielkich zmian w geometrii układu, w tym położenia ładunku oraz zmienności parametrów samego ładunku. Pojedyncze wartości skrajne, takie jak pomiar nr 13 (43,30 g) lub nr 16 (10,50 g), wskazują na występowanie lokalnych odchyleń, co uzasadnia przyjęcie większej liczby prób. Pierwsza seria pomiarowa stanowiła podstawę do wyznaczenia ekwiwalentu trotylowego zastosowanego ładunku, wykorzystywanego w dalszym etapie modelowania numerycznego. Uzyskane dane posłużyły do kalibracji modelu oraz odniesienia wyników eksperymentalnych do parametrów opisujących falę uderzeniową. W kolejnej konfiguracji stanowiska wprowadzono modyfikacje

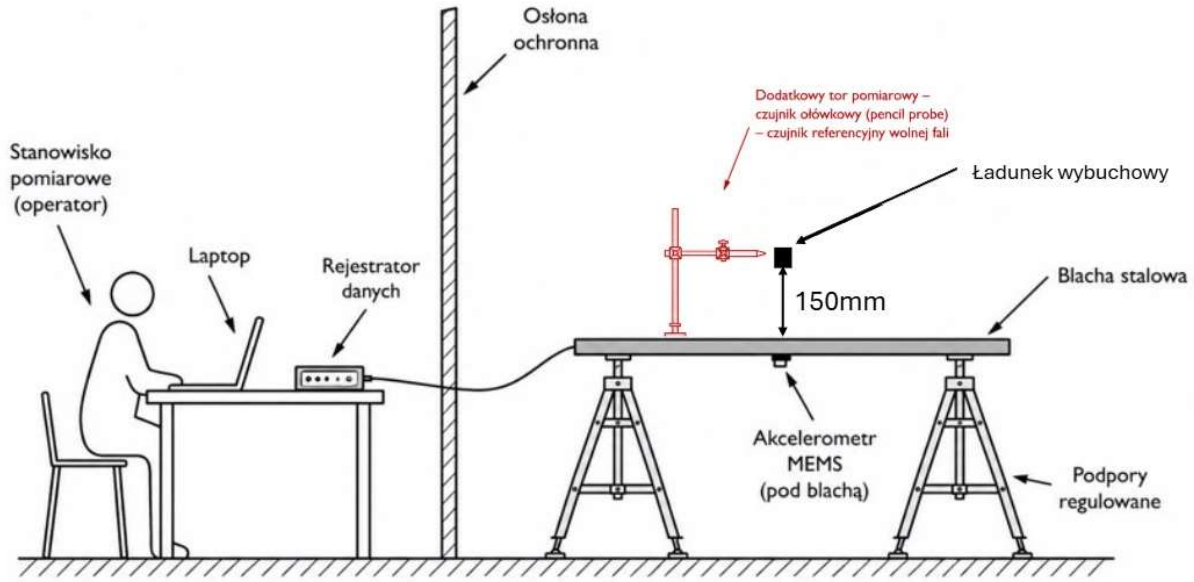
konstrukcyjne, obejmujące zmianę sposobu mocowania ładunku oraz zastosowanie czujnika ciśnienia fali swobodnej, co umożliwiło dokładniejsze odwzorowanie warunków propagacji fali uderzeniowej. Przedstawione wyniki stanowią podstawę do oceny powtarzalności, czułości oraz przydatności systemu pomiarowego w analizie krótkotrwałych zjawisk dynamicznych.

Badania terenowe – seria II

W drugiej konfiguracji stanowiska badawczego wprowadzono dodatkowy tor pomiarowy z czujnikiem referencyjnym wolnej fali (tzw. czujnikiem „ołówkowym") typu PCB 137B21B, współpracującym z systemem SCADAS firmy Siemens. Zastosowany czujnik charakteryzował się zakresem pomiarowym 1000 psi, czułością 0,152 mV/kPa (1,048 mV/psi) oraz rozdzielczością 8,5 mpsi. Czujnik ten jest elementem układu odniesienia dla analizy sygnałów rejestrowanych przez system MEMS, w szczególności w zakresie pomiaru przyspieszeń generowanych przez falę uderzeniową. W celu umożliwienia jednoczesnej rejestracji propagacji fali przez czujnik referencyjny oraz system MEMS zmodyfikowano konfigurację stanowiska. Wprowadzono mechanizm regulacji wysokości zawieszenia ładunku wybuchowego, umożliwiający kontrolę energii przekazywanej do badanego układu. Dodatkowo zmieniono orientację ładunku z pionowej na poziomą – cylindryczny ładunek umieszczano równolegle do powierzchni płyty. Przyjęta konfiguracja sprzyja bardziej powtarzalnej propagacji fali uderzeniowej wzdłuż powierzchni konstrukcji, co umożliwia bezpośrednie porównanie odpowiedzi obu systemów pomiarowych w zbliżonych warunkach propagacji.

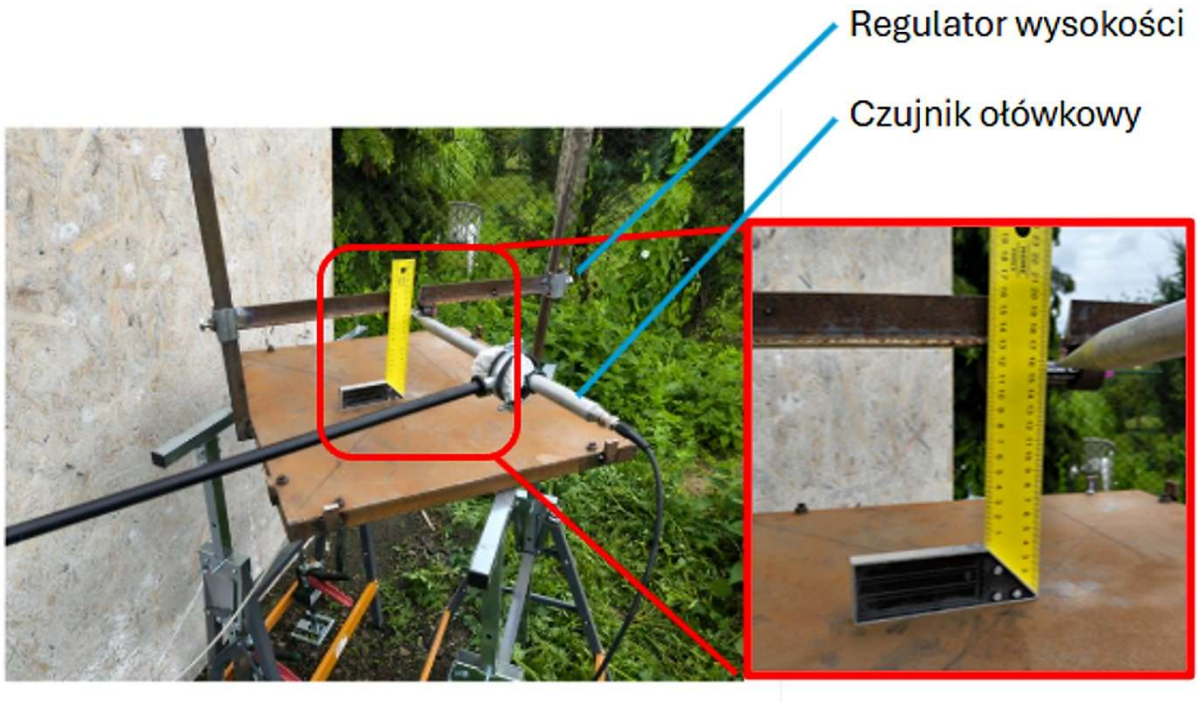
Stanowisko badawcze

W zmodyfikowanej konfiguracji (Rys. 4.6.) stanowiska badawczego wprowadzono rozwiązania umożliwiające precyzyjną kontrolę geometrii układu oraz jednoczesną rejestrację sygnałów z dwóch niezależnych torów pomiarowych.



Rys. 4.6. Schemat zmodyfikowanego stanowiska badawczego

Szczególny nacisk położono na powtarzalność warunków detonacji oraz zgodność rozmieszczenia czujników względem źródła obciążenia.



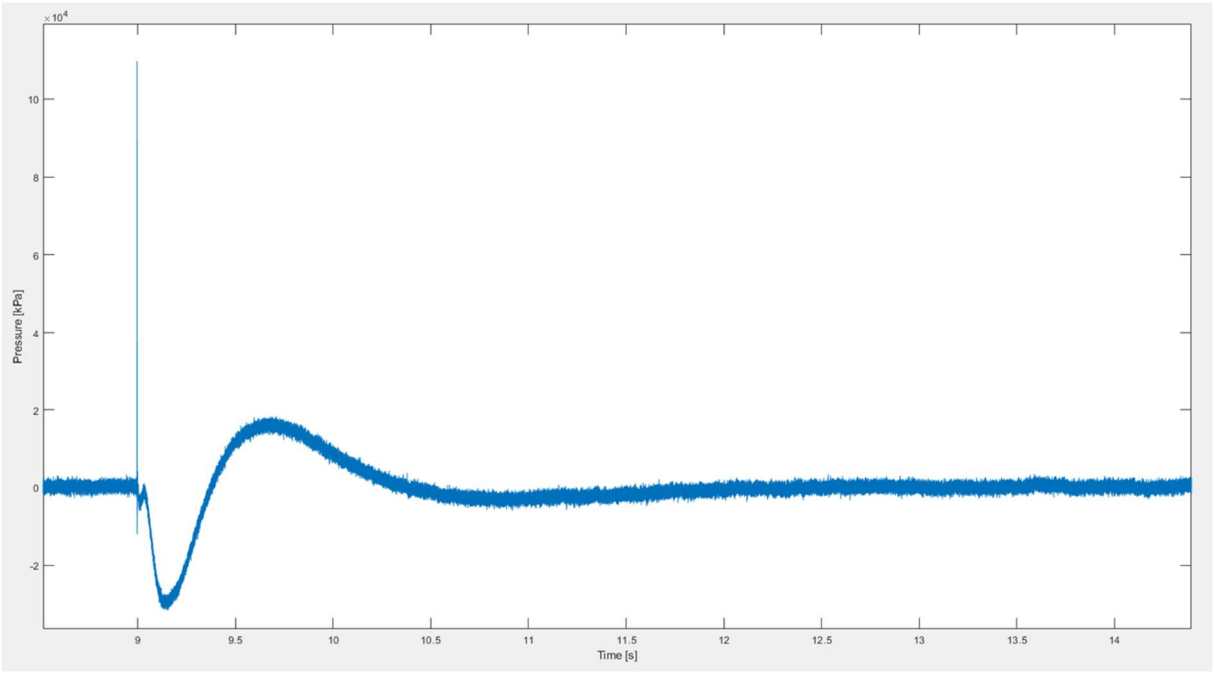
Rys. 4.7. Zmodernizowane stanowisko badawcze

Na rysunku 4.7. przedstawiono widok stanowiska badawczego przeznaczonego do eksperymentów z wykorzystaniem mikroskalowych ładunków cylindrycznych. Widoczny jest mechanizm regulacji wysokości zawieszenia ładunku względem

powierzchni płyty, umożliwiający precyzyjne ustawienie punktu detonacji w osi pionowej. Na rysunku 4.7. przedstawiono również sposób mocowania czujnika referencyjnego typu „ołówkowego” (czujnika fali swobodnej), który umieszczono w tej samej odległości od źródła detonacji co powierzchnia płyty. Takie rozmieszczenie pozwala na rejestrację fali uderzeniowej w porównywalnych warunkach dla obu torów pomiarowych - w powietrzu oraz w strukturze materiału. Przyjęta konfiguracja zapewnia wysoką powtarzalność geometrii układu, co ma kluczowe znaczenie dla wiarygodności wyników oraz umożliwia bezpośrednie porównanie sygnałów rejestrowanych przez różne typy czujników.

Wyniki

Tabela 4.2. przedstawia wyniki pomiarów uzyskane podczas eksperymentu wraz z przypisanym ekwiwalentem trotylowym (TNT equivalent) dla każdego testu, natomiast przykładowy wynik pomiaru ciśnienia przedstawiono na rysunku 4.8. Wartości ekwiwalentu wyznaczono na podstawie charakterystyki nadciśnienia zarejestrowanego przez czujnik referencyjny oraz modelu propagacji fali uderzeniowej opisanego równaniem Kingery-Bulmasha. Ze względu na bardzo małe ilości materiału wybuchowego zastosowanego w badaniach - odpowiadające zakresowi od 30 do 150 mg (0,00003–0,00015 kg TNT) - dostępność danych kalibracyjnych dla tego zakresu jest ograniczona. W związku z tym do oszacowania wartości ekwiwalentu TNT zastosowano ekstrapolację liniową na podstawie danych referencyjnych dla większych ładunków. Uzyskane wartości należy traktować jako przybliżone i wykorzystywać przede wszystkim do porównań względnych pomiędzy poszczególnymi pomiarami, a nie jako bezwzględne odwzorowanie rzeczywistej masy ładunku. Przyjęte podejście umożliwia jednak ocenę odpowiedzi dynamicznej badanego układu oraz stanowi podstawę do dalszej analizy i porównania wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji numerycznych.



Rys. 4.8. Przykładowy wynik pomiaru uzyskanego przy pomocy czujnika ołówkowego

Tabela 4.2. Wyniki pomiarów przyspieszenia oraz ciśnienia – Eksperyment 2

Lp.	Przyspieszenie [g]	Fala ciśnienia [kPa]	Ekwiwalent trotylu [kg]
1	51,13	109,7	0,00011646
2	59,72	116,6	0,00012620
3	30,81	94,6	0,00009516
4	36,87	81,9	0,00007724
5	36,87	101,1	0,00010433
6	18,89	45,2	0,00002547
7	40,97	59,3	0,00004536
8	43,31	89,5	0,00008797
9	40,19	72,7	0,00006426
10	25,14	100,8	0,00010391
Odchylenie standardowe	11,87560057	22,58205777	
Średnia	38,39	87,14	
Współczynnik zmienności	0,309340989	0,259146865	

4.2 Badania numeryczne

W rozdziale przedstawiono wyniki symulacji numerycznych w środowisku LS-Dyna, z wykorzystaniem metodyki opisanej w „Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D". Model numeryczny zweryfikowano na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych uzyskanych w pierwszej serii badań, w szczególności w celu odwzorowania ekwiwalentu trotylowego zastosowanego ładunku. Przyjęte podejście umożliwia analizę propagacji fali uderzeniowej w powietrzu oraz jej oddziaływania na badaną strukturę mechaniczną. Zastosowana metodyka pozwala na odwzorowanie dynamicznego charakteru obciążenia wybuchowego oraz analizę odpowiedzi konstrukcji w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W dalszej części rozdziału przedstawiono założenia modelu, przyjęte parametry oraz warunki brzegowe. Następnie zaprezentowano wyniki symulacji wraz z ich interpretacją oraz porównaniem do danych eksperymentalnych, co umożliwia ocenę poprawności przyjętego modelu.

Model materiałowy

W analizie numerycznej przeprowadzonej w środowisku LS-DYNA płytę zamodelowano z wykorzystaniem liniowo sprężystego modelu materiałowego *MAT_ELASTIC* (MAT_001 – Elastic), dostępnego w standardowej bibliotece programu.

Parametry materiałowe przyjęte w modelu odpowiadają właściwościom stali konstrukcyjnej S235, zgodnie z danymi katalogowymi. W Tabeli 4.3. zestawiono podstawowe parametry użyte do opisu materiału w symulacji.

Tabela. 4.3. Parametry symulacji

Gęstość	Moduł Younga	Liczba Poissona
7800kg/m3	210GPa	0,3

Zastosowanie uproszczonego modelu sprężystego na tym etapie badań umożliwia ocenę odpowiedzi konstrukcji na krótkotrwałe obciążenie dynamiczne wywołane falą

uderzeniową, bez uwzględniania nieliniowych efektów plastyczności oraz zniszczenia materiału.

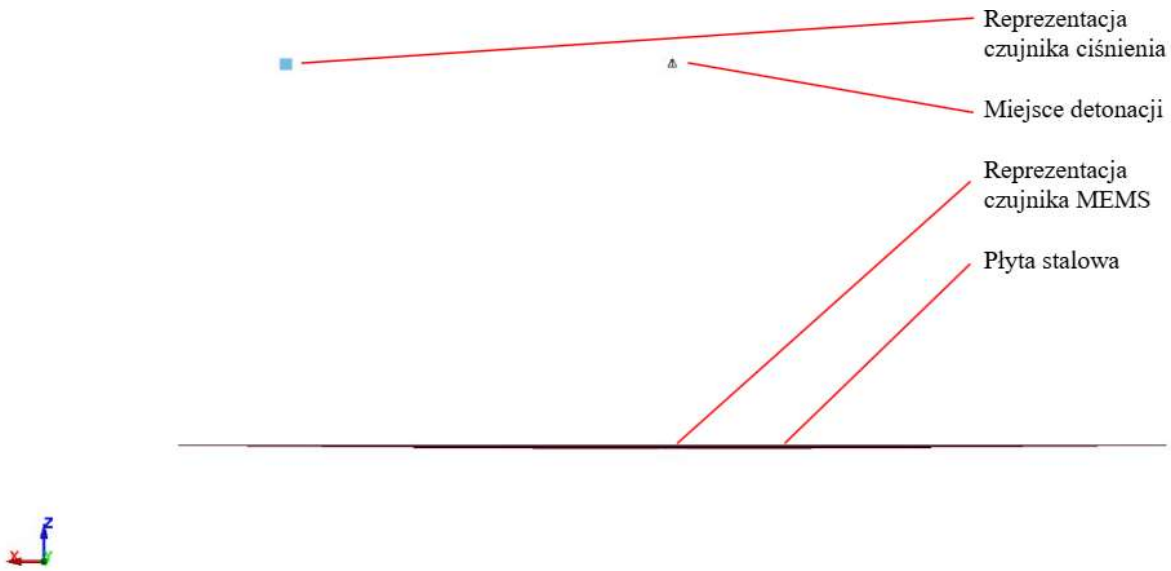
Model 3D

Trójwymiarowy model reprezentujący eksperyment opracowany w środowisku LS-DYNA składa się z dwóch głównych elementów (parts):

• płyty pomiarowej, stanowiącej element konstrukcyjny poddawany bezpośredniemu działaniu obciążenia dynamicznego w postaci rozkładu ciśnienia odwzorowującego falę uderzeniową,
• bryły sztywnej (*rigid body*), reprezentującej czujnik referencyjny typu „ołówkowego".

Element sztywny nie wchodzi w interakcję mechaniczną z płytą i nie wpływa na jej odpowiedź dynamiczną — jego obecność służy wyłącznie do lokalizacji punktu pomiarowego oraz rejestracji danych symulacyjnych w miejscu odpowiadającym rzeczywistej pozycji sensora.

Model nie uwzględnia kontaktu pomiędzy elementami, co upraszcza analizę i pozwala skupić się na odpowiedzi dynamicznej płyty na wymuszenie ciśnieniowe.



Rys. 4.9. Rozmieszczenie elementów symulowanych

Na rysunku 4.9. przedstawiono konfigurację geometryczną modelu, odpowiadającą warunkom eksperymentalnym. Ładunek wybuchowy zlokalizowano na wysokości 150 mm nad powierzchnią płyty. Zaznaczono również punkt pomiarowy odpowiadający lokalizacji czujnika referencyjnego typu „ołówkowego", umożliwiający analizę przebiegu fali uderzeniowej w jego bezpośrednim sąsiedztwie.

Punkt odpowiadający czujnikowi MEMS zdefiniowano na spodniej stronie płyty, w jej centralnej części, zgodnie z konfiguracją stanowiska eksperymentalnego. Przyjęte rozmieszczenie umożliwia analizę lokalnej odpowiedzi konstrukcji oraz bezpośrednie porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi.

Dyskretyzacja

Model numeryczny zdyskretyzowano z wykorzystaniem powierzchniowych elementów skończonych typu *fully integrated shell*, odpowiadających formulacji ELFORM = –16 w środowisku LS-DYNA. Wymiary elementów przyjęto jako 5 mm × 5 mm przy grubości 1 mm, co stanowi kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania lokalnych efektów dynamicznych a czasem obliczeń. Zastosowanie elementów w pełni całkowanych eliminuje zjawisko *hourglassingu*, czyli niepożądanych deformacji geometrycznych charakterystycznych dla elementów z redukowaną liczbą punktów całkowania (*under-integrated*). Zjawisko to może prowadzić do nierealistycznego zachowania modelu, szczególnie w analizach dynamicznych przy dużych prędkościach odkształceń. W przypadku pełnej integracji każdy element posiada wystarczającą liczbę punktów całkowania, co zwiększa stabilność oraz wiarygodność wyników. Zastosowana formulacja –16 stanowi rozwinięcie klasycznego modelu ELFORM 16, zapewniające lepsze odwzorowanie deformacji i rotacji w pojedynczym kroku czasowym. Dodatkowo możliwe jest uaktywnienie obiektywnego przeliczania naprężeń (poprzez parametr IACC = 1 w karcie CONTROL_ACCURACY), co pozwala zachować poprawność transformacji naprężeń w warunkach dużych obrotów. W analizowanym modelu płytę odwzorowano przy użyciu 2968 elementów czterowęzłowych, co zapewnia odpowiednią rozdzielczość siatki w obszarach istotnych

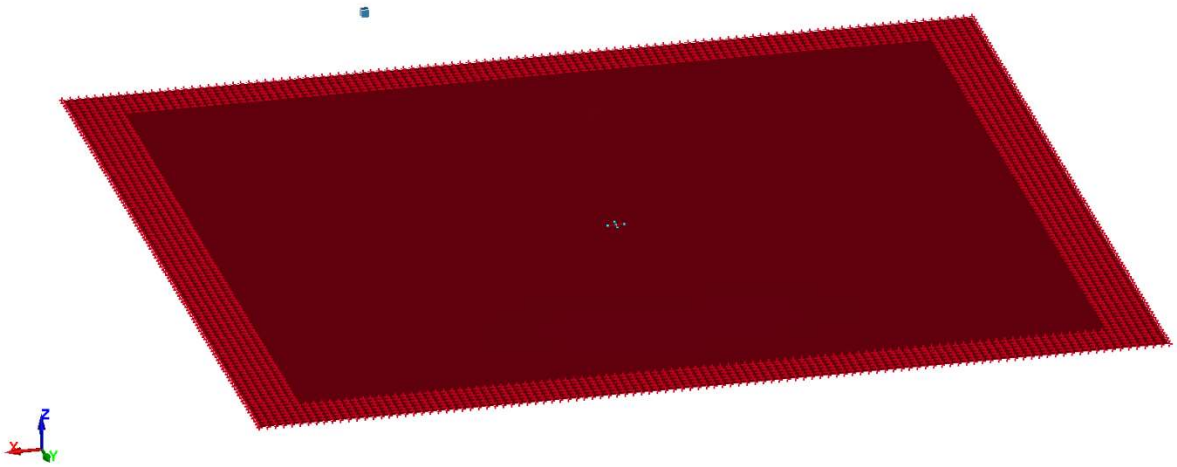
dla propagacji fali uderzeniowej. Dobór parametrów siatki poprzedzono analizą wrażliwości oraz uwzględniono ograniczenia obliczeniowe modelu.

Warunki brzegowe

W celu odwzorowania warunków eksperymentalnych w modelu numerycznym przyjęto zestaw warunków brzegowych opisujących zarówno sposób zamocowania płyty, jak i obecność elementów pomiarowych.

Na wybranych węzłach zlokalizowanych przy krawędziach płyty nałożono warunki typu SPC (*Single Point Constraint*), eliminujące wszystkie translacyjne stopnie swobody. Oznacza to brak możliwości przemieszczeń w kierunkach X, Y oraz Z dla tych węzłów.

Przyjęta konfiguracja odpowiada sztywnemu zamocowaniu płyty w stanowisku badawczym, umożliwiając jednocześnie występowanie odkształceń wewnętrznych pod wpływem obciążenia.



Rys. 4.10. Widok krawędzi płyty z zaznaczonymi węzłami, dla których nałożono warunki SPC

W modelu uwzględniono dodatkowe elementy sztywne (*rigid body*), reprezentujące położenie czujników względem powierzchni płyty. Czujnik referencyjny typu „ołówkowego” odwzorowano jako bryłę sztywną bez możliwości deformacji, co eliminuje jego wpływ na odpowiedź mechaniczną modelu.

Analogicznie zamodelowano akcelerometr MEMS, umieszczony w centralnej części dolnej powierzchni płyty. Element ten przyjęto jako bryłę sztywną o masie odpowiadającej rzeczywistej wartości, co pozwala uwzględnić jego obecność w modelu bez wprowadzania dodatkowych efektów deformacyjnych.

Obciążenie

Źródło obciążenia dynamicznego zlokalizowano na wysokości 150 mm nad środkiem płyty, zgodnie z warunkami eksperymentu terenowego. Detonację odwzorowano poprzez implementację modeli opisujących propagację fali uderzeniowej:

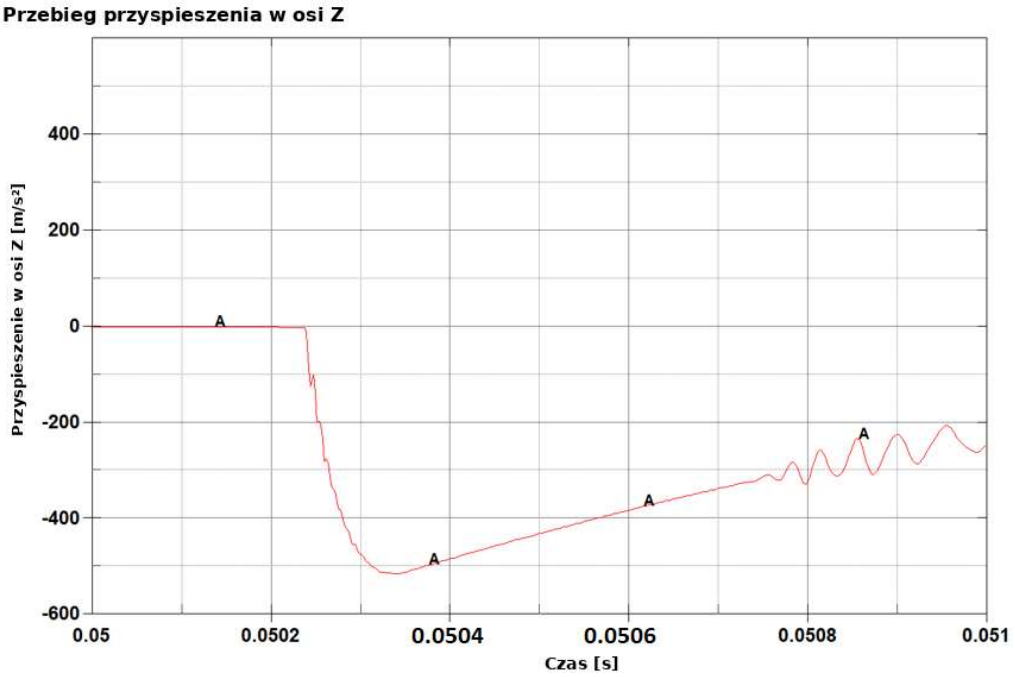
- Model Friedlandera – podstawowy opis teoretyczny fali uderzeniowej,
- Model CONWEP (Conventional Weapons Effects Program) – powszechnie stosowany model empiryczny, dostosowany do implementacji w środowiskach LS-DYNA (Blast Enhanced).

Obciążenie zadano w postaci rozkładu ciśnienia działającego na powierzchnię płyty, odpowiadającego ekwiwalentowi trotylowemu w zakresie od 5 mg do 100 mg, ze skokiem co 5 mg. Pozwoliło to na przeprowadzenie serii symulacji umożliwiających ocenę odpowiedzi dynamicznej układu dla różnych intensywności wybuchu.

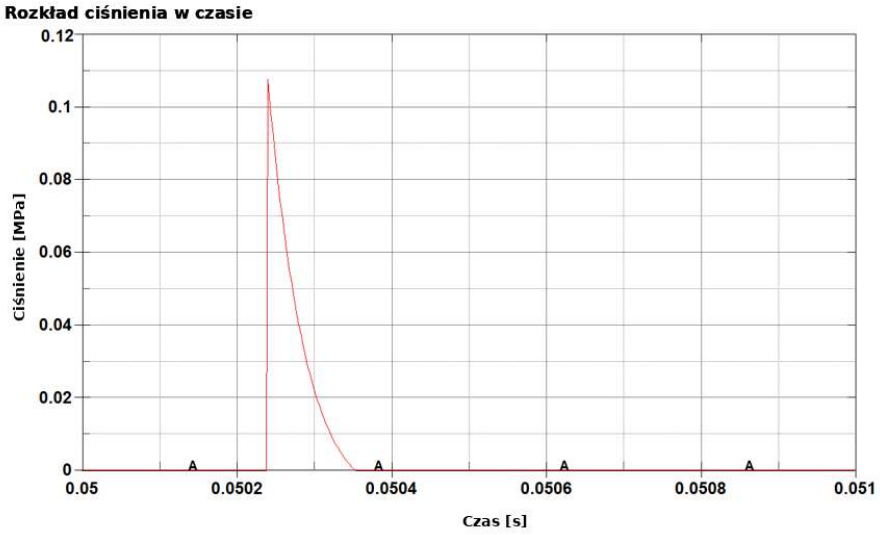
Dodatkowo w modelu uwzględniono działanie przyspieszenia ziemskiego, wprowadzając stałe pole grawitacyjne. Ze względu na krótkotrwały charakter zjawiska jego wpływ na odpowiedź dynamiczną układu jest ograniczony, jednak jego uwzględnienie pozwala zachować zgodność z rzeczywistymi warunkami eksperymentu.

Wyniki symulacji

Analizie poddano przebiegi przyspieszenia (Rys. 4.11.) oraz ciśnienia (Rys. 4.12.) w punktach odpowiadających lokalizacji czujników w układzie eksperymentalnym. Uzyskane wyniki odzwierciedlają charakter propagacji fali uderzeniowej oraz jej oddziaływanie na badaną konstrukcję, w tym występowanie krótkotrwałych impulsów dynamicznych oraz następujących po nich drgań układu. Przebiegi sygnałów wykazują wyraźną zależność od przyjętego ekwiwalentu trotylowego, co pozwala na ocenę wpływu intensywności obciążenia na odpowiedź dynamiczną. Zaprezentowane wyniki stanowią podstawę do dalszej analizy i zostaną wykorzystane w kolejnych etapach pracy do porównania z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi w zmodyfikowanej konfiguracji stanowiska badawczego.



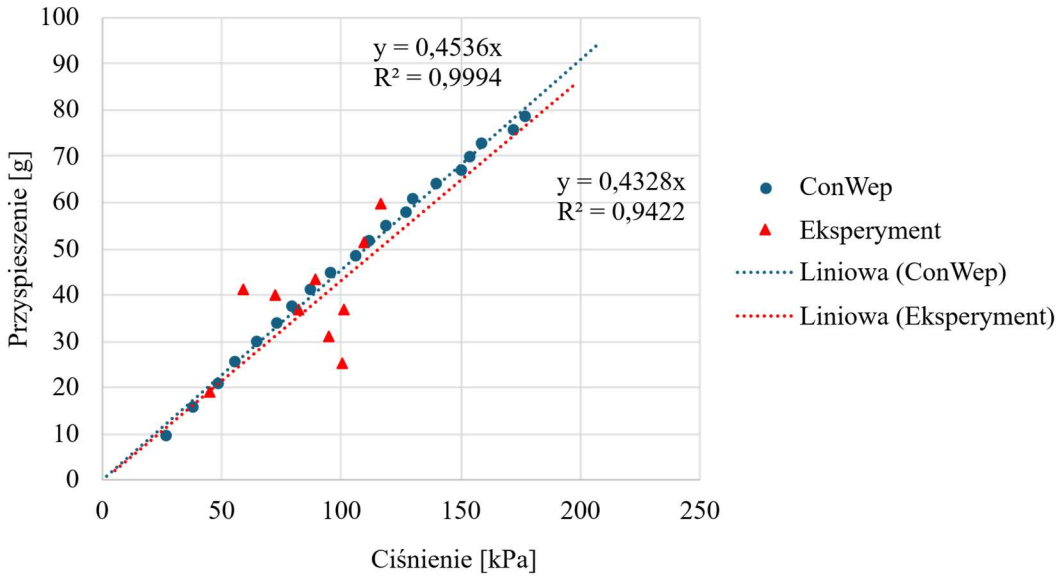
Rys. 4.11. Przebieg zmian przyspieszenia w punkcie odpowiadającym położeniu czujnika MEMS dla detonacji ładunku o ekwiwalencie 55 mg TNT



Rys. 4.12. Przebieg zmian ciśnienia w punkcie odpowiadającym położeniu czujnika referencyjnego, ładunek o ekwiwalencie 55 mg TNT

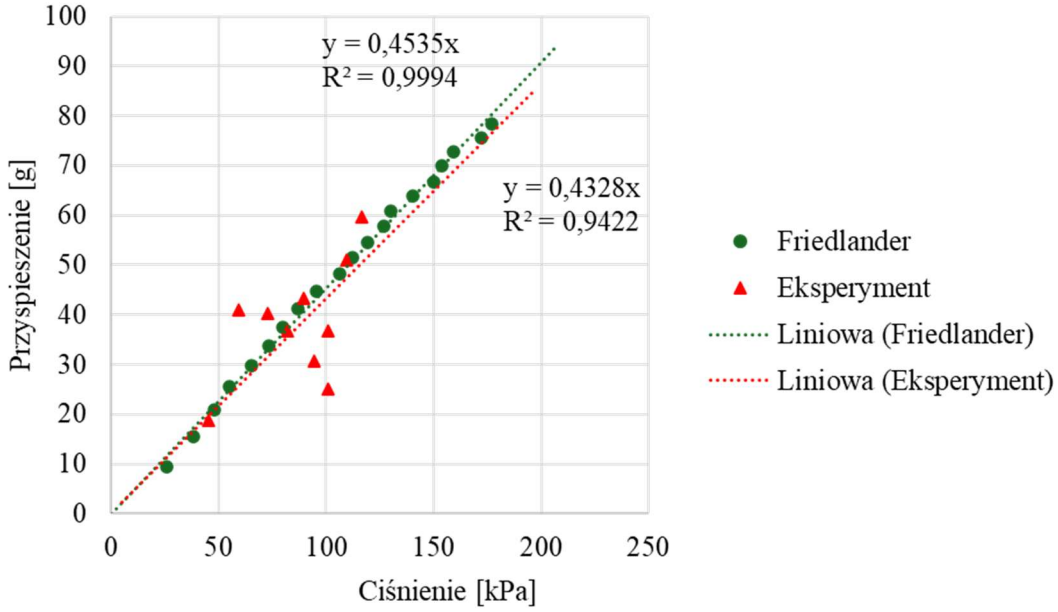
4.3 Analiza wyników symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych

W niniejszym podrozdziale przedstawiono porównanie wyników symulacji numerycznych odpowiedzi dynamicznej płyty z danymi uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch podejść do modelowania obciążenia wybuchowego: modelu Friedlandera, opartego na teoretycznym opisie przebiegu fali ciśnienia, oraz modelu CONWEP (*Conventional Weapons Effects Program*), bazującego na danych empirycznych dla detonacji trotylu i zaimplementowanego w środowisku LS-DYNA. Celem analizy było określenie stopnia zgodności sygnałów przyspieszeń uzyskanych numerycznie z przebiegami zarejestrowanymi eksperymentalnie przy użyciu czujnika MEMS oraz czujnika referencyjnego. Ocenie poddano zarówno charakter przebiegów czasowych, jak i wartości maksymalne sygnałów, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przyjętego modelu obciążenia na jakość odwzorowania zjawiska fali uderzeniowej. Przeprowadzone porównanie umożliwia ocenę skuteczności kalibracji modelu numerycznego oraz przydatności zastosowanych metod w analizie mikroskalowych detonacji.



Rys. 4.13. Analiza porównawcza

Na rysunku 4.13. przedstawiono przebieg przyspieszenia uzyskany w symulacji numerycznej dla obciążenia zdefiniowanego z wykorzystaniem modelu CONWEP. Model ten bazuje na empirycznych charakterystykach fali uderzeniowej generowanej przez detonację trotylu, co pozwala na odwzorowanie rzeczywistego przebiegu obciążenia dynamicznego działającego na płytę. Uzyskany sygnał odzwierciedla impulsowy charakter wymuszenia oraz następującą po nim odpowiedź dynamiczną konstrukcji.



Rys. 4.14. Analiza porównawcza

Na rysunku 4.14. przedstawiono przebieg przyspieszenia uzyskany przy zastosowaniu modelu Friedlandera, opartego na teoretycznym opisie propagacji fali ciśnienia w powietrzu. Model ten stanowi uproszczone podejście do odwzorowania obciążenia wybuchowego, jednak pozwala na analizę podstawowych cech odpowiedzi dynamicznej, takich jak charakter przebiegu czasowego oraz wartości maksymalne przyspieszenia.

Przeprowadzone analizy numeryczne wskazują na wysoką zgodność pomiędzy wynikami symulacji a wynikami badań eksperymentalnych uzyskanymi podczas badań polowych. Zarówno model obciążenia oparty na opisie Friedlandera, jak i metoda CONWEP wykazały zbliżoną charakterystykę przebiegów oraz porównywalne wartości maksymalne przyspieszeń w centralnym punkcie płyty, co potwierdza poprawność przyjętych założeń modelowych oraz zastosowanej metodyki odwzorowania zjawiska wybuchu w mikroskali. Zaobserwowano również zależność pomiędzy amplitudą przyspieszeń konstrukcji a ciśnieniem generowanym przez falę uderzeniową, zgodną z podstawowymi prawami dynamiki układów sprężystych, co dodatkowo potwierdza trafność przyjętych założeń kalibracyjnych. Pomimo różnic w sposobie opisu obciążenia, obie metody numeryczne prowadzą do zbliżonych wyników, zarówno pod względem kształtu sygnału, jak i jego wartości maksymalnych. Uzyskana spójność wskazuje na przydatność środowiska LS-DYNA w analizie szybkich zjawisk dynamicznych, również w zakresie mikroskalowych ładunków wybuchowych. Otrzymane wyniki stanowią podstawę do dalszej interpretacji danych pomiarowych oraz mogą być wykorzystane w procesie planowania i optymalizacji kolejnych badań eksperymentalnych.

5. Modelowanie czujnika MEMS

W analizie zjawisk impulsowych istotne znaczenie ma prawidłowa interpretacja sygnałów rejestrowanych przez czujniki MEMS. Odpowiedź sensora zależy nie tylko od wartości wymuszenia, ale również od właściwości dynamicznych jego struktury mechanicznej oraz parametrów toru przetwarzania sygnału. W przypadku krótkotrwałych impulsów o dużej amplitudzie, takich jak oddziaływanie fali uderzeniowej, wpływ tych czynników może być szczególnie istotny.

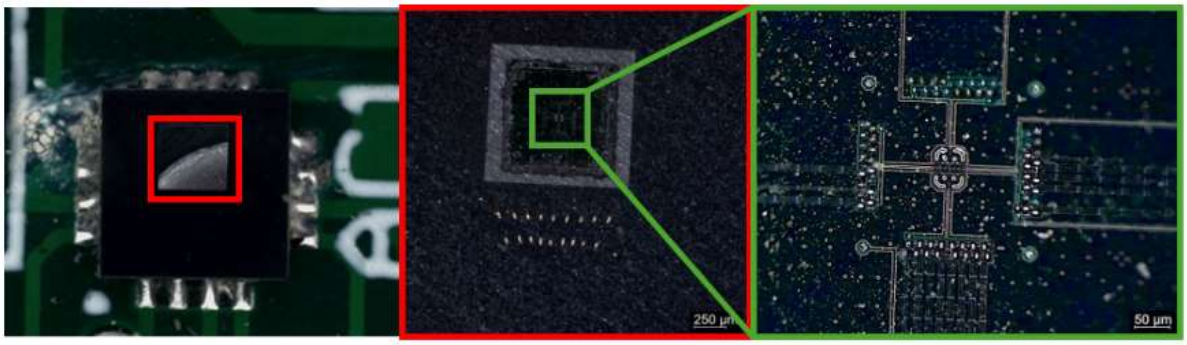
W literaturze spotykane są zarówno modele analityczne, jak i numeryczne czujników MEMS. W zależności od zastosowania wykorzystywane są modele funkcjonalne opisujące zależność pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym, modele o parametrach skupionych bazujące na układzie masa–sprężyna–tłumik oraz modele wykorzystujące metodę elementów skończonych do analizy zachowania struktury mechanicznej [80–85]. W wielu przypadkach parametry modeli przyjmowane są na podstawie danych katalogowych, założeń projektowych lub procedur kalibracyjnych. Znacznie rzadziej spotykane są opracowania obejmujące identyfikację rzeczywistej struktury badanego czujnika oraz wyznaczenie parametrów modelu na podstawie badań materiałowych, geometrycznych i dynamicznych przeprowadzonych dla konkretnego sensora [80–85].

Z tego względu opracowano model wybranego typu czujnika MEMS - ADXL377 na podstawie wyników badań jego budowy, właściwości materiałowych oraz parametrów dynamicznych. W odróżnieniu od podejścia wykorzystującego wyłącznie charakterystyki katalogowe, model opracowano z wykorzystaniem danych uzyskanych podczas badań strukturalnych i materiałowych sensora. W dalszej części rozdziału przedstawiono proces identyfikacji budowy czujnika oraz kolejne etapy opracowania modelu mechanicznego, elektrycznego i elektromechanicznego.

5.1 Modelowanie zjawisk mechanicznych

W pierwszym etapie przyjęto uproszczony model pojedynczego stopnia swobody (1-DOF), w którym masa sejsmiczna zawieszona na elementach sprężystych ulega przemieszczeniu pod wpływem ruchu obudowy. Model ten stanowi punkt wyjścia do dalszej analizy dynamicznej. Następnie rozszerzono go do postaci trójosiowej, odpowiadającej rzeczywistej konstrukcji czujnika.

W celu wyznaczenia parametrów modelu konieczne było określenie budowy wewnętrznej badanego czujnika. W tym celu przeprowadzono mechaniczne usunięcie obudowy umożliwiające dostęp do struktury pomiarowej. Na rysunku 5.1. przedstawiono kolejne etapy odsłaniania wnętrza czujnika prowadzące do identyfikacji elementów mechanicznych odpowiedzialnych za realizację pomiaru przyspieszeń. Uzyskany dostęp do struktury umożliwił przeprowadzenie dalszych badań materiałowych, pomiarów geometrycznych oraz analiz właściwości dynamicznych wykorzystywanych podczas opracowania modelu.

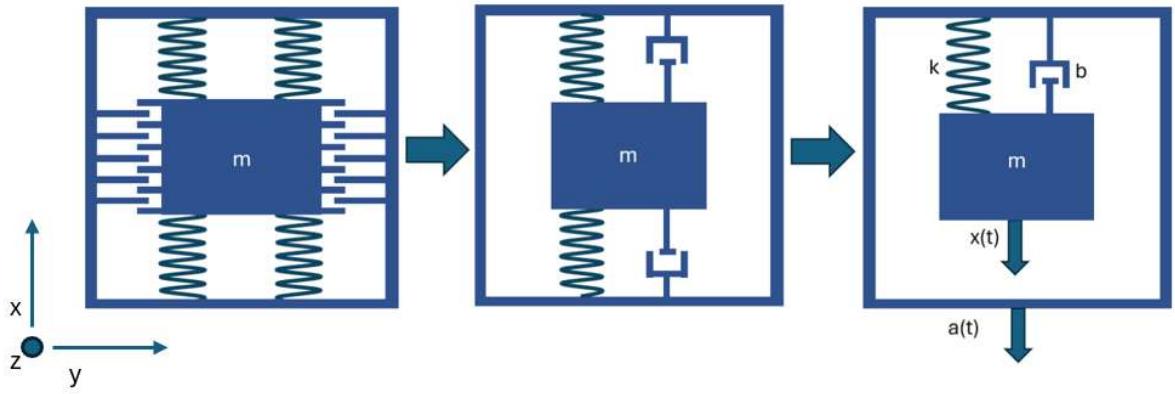


Rys. 5.1. Wewnętrzna struktura czujnika MEMS – widok umożliwiający analizę struktury mechanicznej i materiałowej sensora

Parametry modelu wyznaczono na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz identyfikacji geometrii i właściwości materiałowych komponentów MEMS. Uzyskany opis stanowi podstawę do budowy modelu elektromechanicznego czujnika oraz analiz numerycznych.

Model mechaniczny czujnika bazuje na opisie relacji między ruchem obudowy a przemieszczeniem masy sejsmicznej. Właściwości układu odwzorowano za pomocą

parametrów skupionych, w szczególności sztywności i tłumienia. Ich wartości wyznaczono na podstawie obliczeń numerycznych z uwzględnieniem geometrii oraz właściwości materiałowych elementu pomiarowego. Uzupełnieniem było eksperymentalne określenie wymiarów masy sejsmicznej na podstawie pomiarów interferometrycznych oraz obserwacji mikroskopowych. Uzyskane dane umożliwiły określenie rozkładu masy oraz parametrów mechanicznych modelu. Na tej podstawie przyjęto uproszczony opis w postaci układu o parametrach skupionych stanowiący odwzorowanie rzeczywistej struktury czujnika.



Rys. 5.2. Schemat procesu modelowania

Rysunek 5.2. przedstawia uproszczony model fizyczny czujnika MEMS w postaci układu o parametrach skupionych, w którym masa sejsmiczna odwzorowana jest jako element o masie m, połączony ze sprężyną o sztywności k oraz tłumikiem wiskotycznym o współczynniku tłumienia b. Przyjęte uproszczenie pozwala na opis dynamiki układu poprzez sformułowanie równania ruchu wynikającego z bilansu sił działających
na element układu, co przedstawiono na równaniach (5.1. - 5.4.).

Siła sprężystości opisana jako:

$$F_k = k(a - x) \tag{5.1.}$$

Natomiast siła tłumienia:

$$F_b = b(\dot{a} - \dot{x}) \tag{5.2.}$$

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona, suma sił działających na masę jest równa iloczynowi masy i przyspieszenia:

$$m\ddot{x} = F_k + F_b \tag{5.3.}$$

$$m\ddot{x} = k(a - x) + b(\dot{a} - \dot{x}) \tag{5.4.}$$

gdzie:

m – masa ciała [kg],

k – sztywność sprężyny [N/m],

b – współczynnik tłumienia [N*s/m],

$\ddot{x}$ – przyspieszenie ciała [m/s²],

x – przemieszczenie ciała [m],

$\dot{x}$ – prędkość ciała [m/s],

a – przemieszczenie obudowy czujnika [m],

$\dot{a}$ – prędkość obudowy czujnika [m/s],

po podzieleniu obu stron przez m równanie (3.1) przyjmuje postać:

$$\ddot{x} = \frac{k(a - x)}{m} + \frac{b(\dot{a} - \dot{x})}{m} \tag{5.5.}$$

Równanie (5.5.) opisuje przyspieszenie masy sejsmicznej.

5.2 Identyfikacja struktury czujnika MEMS

W niniejszym podrozdziale przedstawiono proces identyfikacji struktury czujnika MEMS oraz jego charakterystyki dynamicznej. Analiza obejmuje kolejno badania strukturalne, pomiary geometryczne oraz eksperymentalną weryfikację odpowiedzi dynamicznej.

W pierwszym etapie podjęto próbę nieinwazyjnej identyfikacji struktury z wykorzystaniem tomografii komputerowej, jednak ze względu na ograniczenia tej metody w obrazowaniu elementów metalizowanych konieczne było przeprowadzenie dalszych analiz po otwarciu czujnika. Następnie wykonano pomiary geometryczne z wykorzystaniem interferometrii optycznej, a końcowym etapem była analiza dynamiczna z użyciem interferometru laserowego, umożliwiająca ocenę pracy poszczególnych osi pomiarowych oraz weryfikację braku sprzężeń międzyosiowych.

Analiza strukturalna

Tomografia komputerowa (CT) została zastosowana jako metoda nieinwazyjna umożliwiająca orientacyjną ocenę rozmieszczenia elementów wewnętrznych czujnika MEMS w obrębie obudowy. Ze względu na ograniczoną rozdzielczość przestrzenną mikrotomografii metoda ta nie pozwala na bezpośrednią analizę szczegółowej struktury krzemowej stanowiącej właściwy element pomiarowy. Umożliwia jednak określenie jej położenia względem obudowy oraz identyfikację przebiegu wyprowadzeń elektrycznych łączących strukturę z padami kontaktowymi. Uzyskane informacje stanowiły podstawę do zaplanowania dalszych prac eksperymentalnych, w szczególności sposobu otwarcia czujnika umożliwiającego dostęp do struktury pomiarowej.

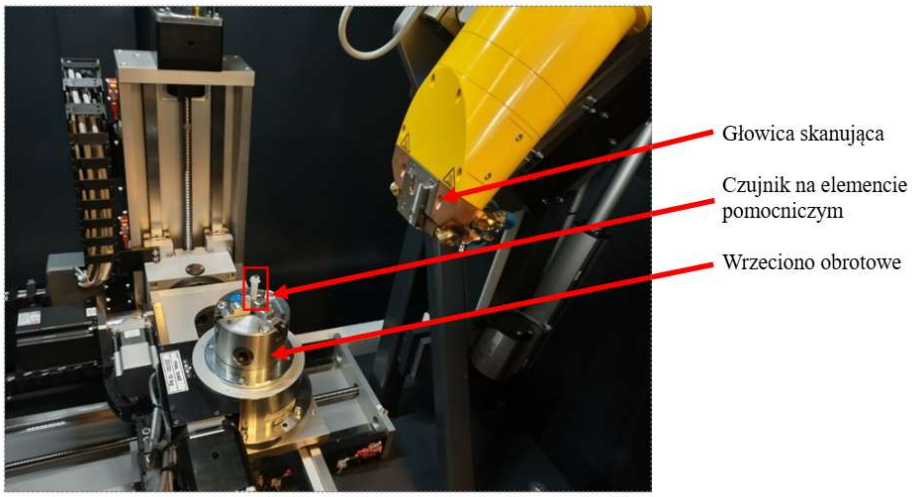


Rys. 5.3. Phoenix V|tome|x S 240

System Phoenix V|tome|x S 240 (Rys. 5.3.) jest urządzeniem do tomografii komputerowej oraz metrologii trójwymiarowej, wykorzystywanym do analizy

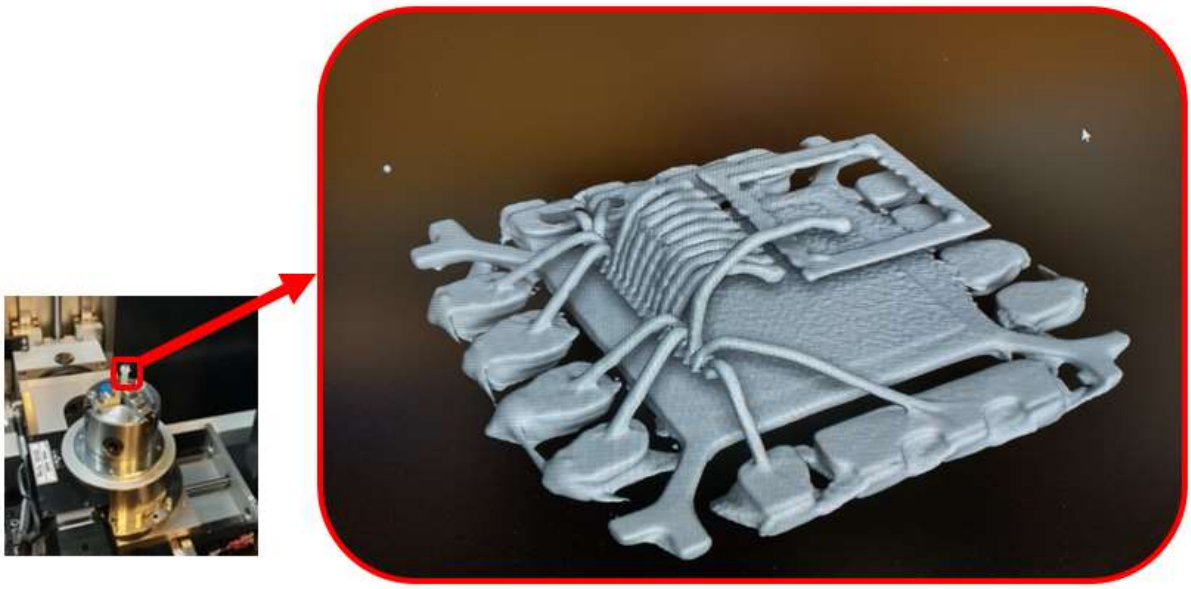
geometrii wewnętrznej obiektów. Umożliwia realizację zarówno projekcji dwuwymiarowych z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego, jak i rekonstrukcji trójwymiarowych w technologii microCT.

W przeprowadzonych badaniach, system Phoenix wykorzystano do nieinwazyjnego określenia położenia struktury krzemowej oraz przebiegu wyprowadzeń elektrycznych względem obudowy czujnika. Z uwagi na ograniczoną rozdzielczość przestrzenną mikrotomografii metoda ta nie pozwala na analizę szczegółów mikrostruktury, jednak zapewnia wystarczającą dokładność do celów lokalizacyjnych i przygotowania dalszych etapów badań.



Rys. 5.4. Czujnik MEMS zamontowany w skanerze CT

Na fotografii (Rys. 5.4.) przedstawiono czujnik MEMS zamocowany w elemencie pomocniczym, umieszczonym w uchwycie samocentrującym skanera CT. Zastosowany sposób montażu zapewnia stabilne i powtarzalne pozycjonowanie próbki względem osi obrotu, co ma istotne znaczenie dla poprawności rekonstrukcji trójwymiarowej. Przyjęta konfiguracja umożliwiła uzyskanie danych obrazowych pozwalających na identyfikację geometrii obudowy oraz orientacyjne określenie rozmieszczenia elementów wewnętrznych czujnika.



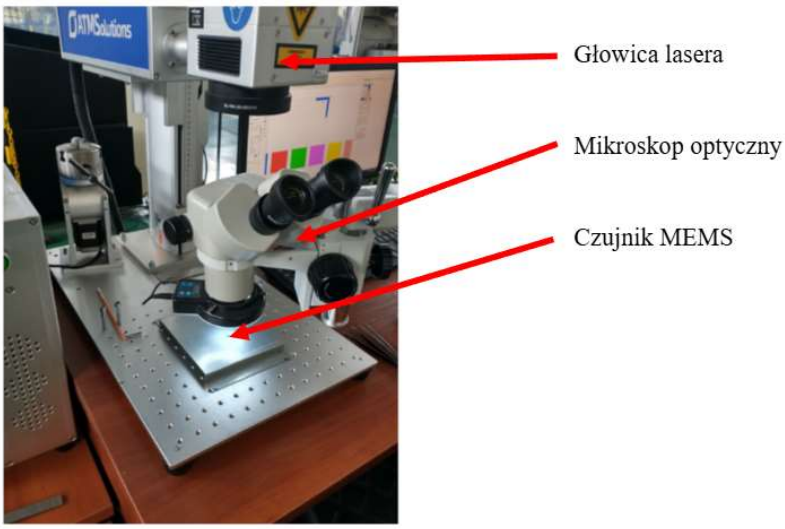
Rys 5.5. Wynik mikrotomografi komputerowej

Na rysunku 5.5. przedstawiono wynik rekonstrukcji tomograficznej czujnika MEMS, umożliwiający orientacyjne określenie położenia struktury krzemowej wewnątrz obudowy. Informacja ta została wykorzystana do wyznaczenia kierunku oraz zakresu dalszej obróbki mechanicznej prowadzącej do odsłonięcia elementu pomiarowego. Widoczny na obrazie kontrastowy obszar wskazuje przybliżoną lokalizację struktury krzemowej. Szczegóły jej geometrii nie zostały odwzorowane, co wynika z ograniczonej rozdzielczości metody oraz właściwości materiałowych krzemu. Uzyskany obraz był jednak wystarczający do określenia położenia elementu pomiarowego względem obudowy.

Interferometria optyczna została zastosowana do identyfikacji geometrii odsłoniętej struktury czujnika MEMS, w szczególności do określenia wymiarów w kierunku prostopadłym do powierzchni. Metoda umożliwia precyzyjne wyznaczenie wysokościowych cech struktury, stanowiąc uzupełnienie pomiarów mikroskopowych wykorzystywanych do określenia wymiarów w płaszczyźnie.

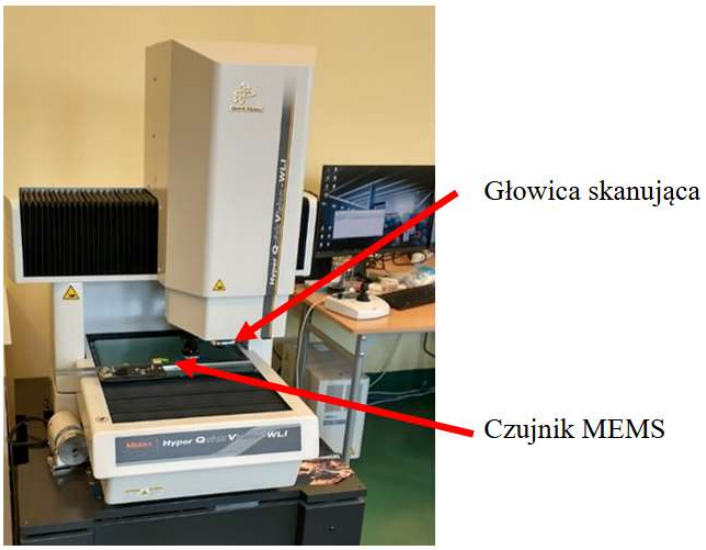
Do usunięcia górnej warstwy obudowy czujnika zastosowano grawerkę laserową. Metoda ta umożliwia kontrolowane usuwanie materiału z ograniczeniem wpływu

na odsłanianą strukturę. Przeprowadzony proces pozwolił na uzyskanie dostępu do elementu pomiarowego przy zachowaniu jego integralności geometrycznej.



Rys. 5.6. Stanowisko z grawerką laserową ATMsolutions wyposażone w mikroskop do precyzyjnej kontroli procesu usuwania warstwy czujnika MEMS

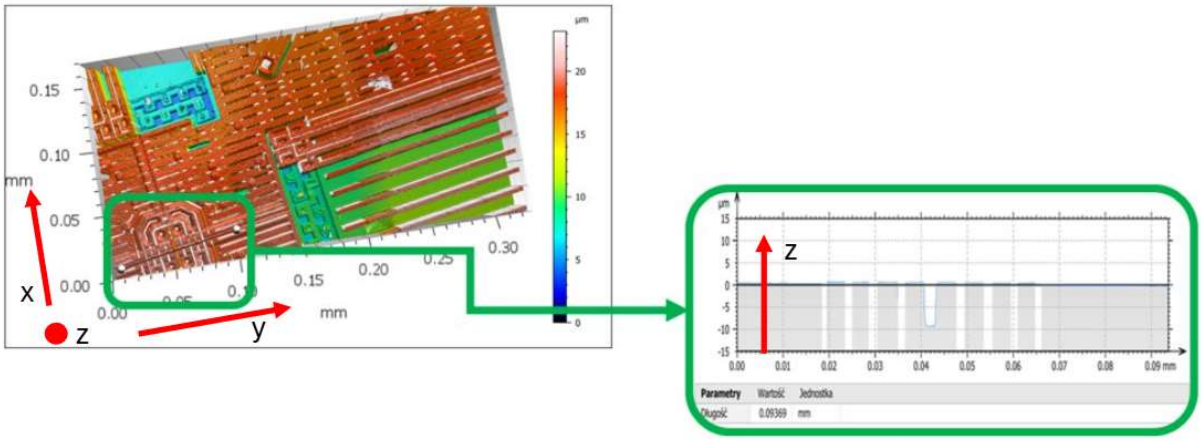
Proces usuwania kolejnych warstw obudowy był monitorowany z wykorzystaniem mikroskopu optycznego (Rys. 5.6.), umożliwiającego bieżącą kontrolę postępu obróbki. Obserwacja prowadzona była po każdym etapie usuwania materiału, co pozwoliło na precyzyjne odsłonięcie struktury krzemowej oraz ograniczenie ingerencji w jej geometrię.



Rys. 5.7. Interferometr Mitutoyo

Po otwarciu czujnika MEMS odsłonięta masa sejsmiczna została poddana pomiarom geometrycznym, w tym wyznaczeniu wysokości z wykorzystaniem interferometru optycznego Mitutoyo (Rys. 5.7.). Zastosowana metoda umożliwia bezkontaktowy pomiar topografii powierzchni z wysoką rozdzielczością w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki.

Pomiary interferometryczne stanowiły uzupełnienie obserwacji mikroskopowych, umożliwiając określenie wymiarów struktury w osi Z. Metoda interferometryczna pozwala na wyznaczenie wysokościowych cech struktury z rozdzielczością niedostępną dla metod optycznych opartych wyłącznie na obserwacji mikroskopowej.



Rys. 5.8. Widok badanego fragmentu struktury krzemowej

Na rysunku (Rys. 5.8.) przedstawiono wynik pomiaru interferometrycznego badanego fragmentu struktury, w postaci rozkładu wysokości w kierunku normalnym do powierzchni. Na tej podstawie określono wysokość elementu równą 9,5 µm. Uzyskaną wartość przyjęto jako parametr geometryczny masy sejsmicznej w modelu matematycznym zjawisk mechanicznych.

Do badania odpowiedzi struktury krzemowej czujnika MEMS na zadane wymuszenie zastosowano system wibrometrii laserowej Polytec MSA-500. Metoda ta umożliwia bezkontaktowy pomiar przemieszczeń z wysoką rozdzielczością.

Celem pomiarów była weryfikacja niezależności pracy poszczególnych osi detekcyjnych poprzez analizę odpowiedzi struktury na wymuszenia kierunkowe.

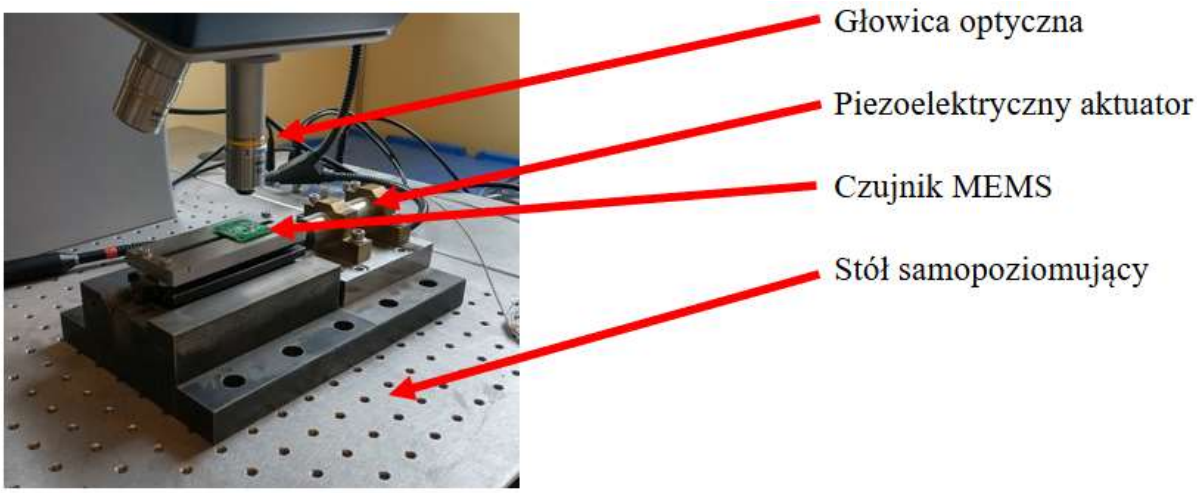
System Polytec MSA-500 umożliwia bezkontaktowy pomiar przemieszczeń z wykorzystaniem interferometrii laserowej, realizowany w dziedzinie czasu i częstotliwości. Po odsłonięciu struktury czujnika przeprowadzono badania dynamiczne polegające na wzbudzeniu drgań oraz rejestracji przemieszczeń elementów struktury krzemowej. Analiza obejmowała ocenę odpowiedzi układu na wymuszenia kierunkowe, w szczególności pod kątem niezależności poszczególnych osi pomiarowych. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci graficznej reprezentacji przemieszczeń.

Na fotografii (Rys. 5.9.) przedstawiono stanowisko pomiarowe obejmujące głowicę optyczną systemu pomiarowego, piezoelektryczny aktuator oraz czujnik MEMS zamocowany na mechanizmie precyzyjnego pozycjonowania.



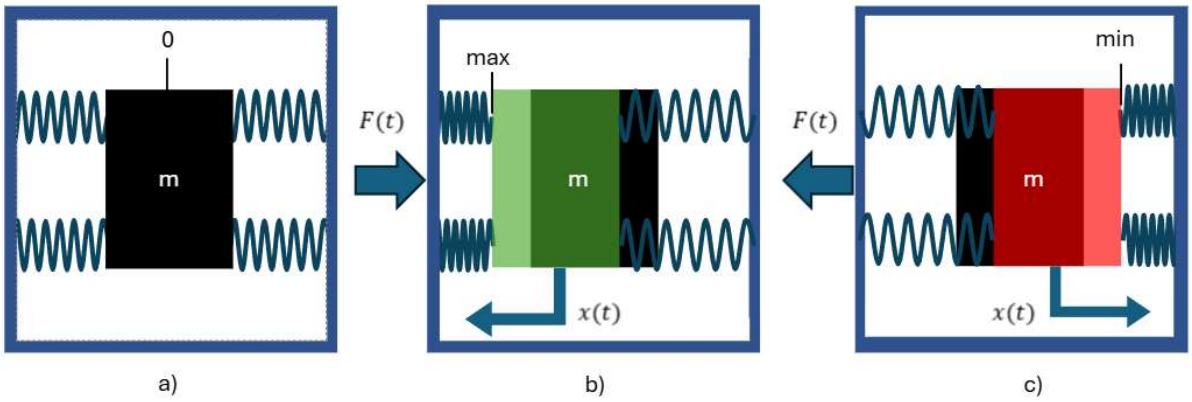
Rys. 5.9. Zbliżenie na stanowisko badawcze Polytec MSA-500 w trakcie pomiaru

Na fotografii (Rys. 5.10.) przedstawiono fragment stanowiska badawczego obejmujący piezoelektryczny aktuator, głowicę optyczną systemu interferometrycznego oraz czujnik MEMS. Aktuator realizuje wymuszenie drganiowe w postaci sygnału typu chirp (przemiatanie częstotliwości), natomiast pomiar przemieszczeń prowadzony jest z wykorzystaniem głowicy interferometrycznej. Czujnik umieszczono na stole samopoziomującym, który zapewnia stabilne położenie oraz minimalizuje niekontrolowane odchylenia względem osi pomiarowej. Przyjęta konfiguracja umożliwia precyzyjne odwzorowanie odpowiedzi dynamicznej struktury przy zadanym wymuszeniu.



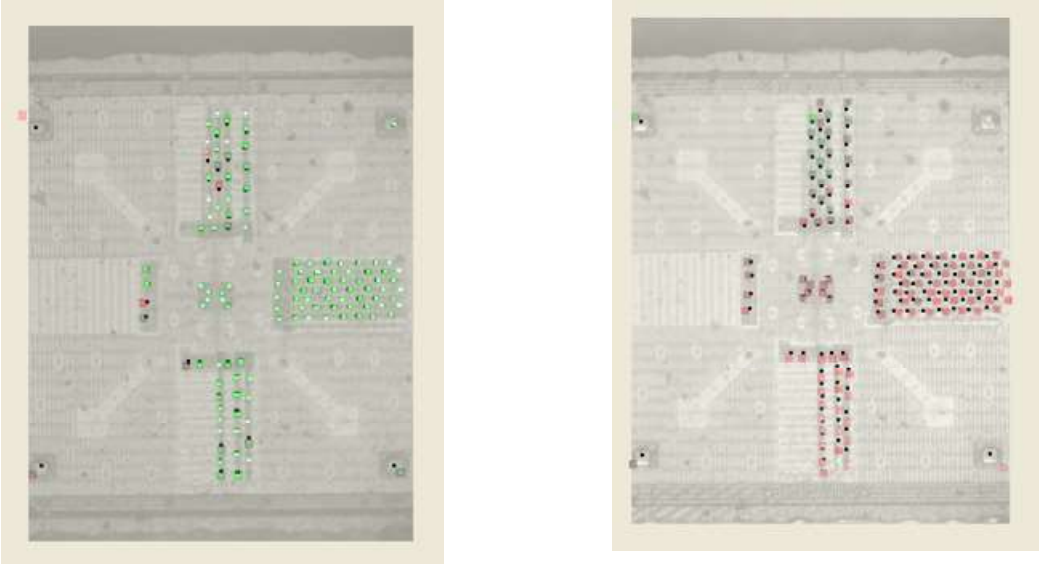
Rys. 5.10. Układ wymuszający w osi równoległej do powierzchni roboczej

Na schemacie (Rys. 5.11.) przedstawiono interpretację wyników uzyskanych z pomiarów wibrometrycznych. Wyróżniono trzy charakterystyczne położenia badanego elementu: pozycję równowagi (a) oraz dwa skrajne wychylenia odpowiadające maksymalnemu przemieszczeniu w przeciwnych kierunkach (b, c). Schemat stanowi odniesienie do analizy przemieszczeń rejestrowanych w trakcie wzbudzenia.



Rys. 5.11. Sekwencyjne przedstawienie metodyki badań doświadczalnych

Położenie równowagi oznaczono kolorem czarnym i przyjęto jako punkt odniesienia. Kolory czerwony i zielony odpowiadają skrajnym pozycjom osiąganym podczas drgań. Jednoczesne przedstawienie tych położeń umożliwia określenie zakresu przemieszczeń masy sejsmicznej względem położenia równowagi.



a) b)

Rys. 5.12. Wizualizacja odpowiedzi masy sejsmicznej na wymuszenie

Przedstawione obrazy (Rys. 5.12. a oraz b) ilustrują odpowiedź dynamiczną struktury czujnika MEMS na wymuszenie w zadanym kierunku, zarejestrowaną przy użyciu wibrometrii laserowej. Zaprezentowano dwa skrajne położenia odpowiadające maksymalnym wychyleniom w przeciwnych kierunkach, reprezentujące różne fazy tego samego cyklu drgań. Analiza przemieszczeń wskazuje na dominującą odpowiedź w kierunku wymuszenia, przy braku istotnych przemieszczeń w osiach prostopadłych. Otrzymane wyniki potwierdzają niezależność pracy poszczególnych osi pomiarowych czujnika. Zaprezentowane obrazy stanowią reprezentatywne ujęcie przebiegu drgań, którego pełny przebieg czasowy przemieszczeń został zarejestrowany w postaci nagrania. Analiza obejmowała pełny przebieg czasowy sygnału.

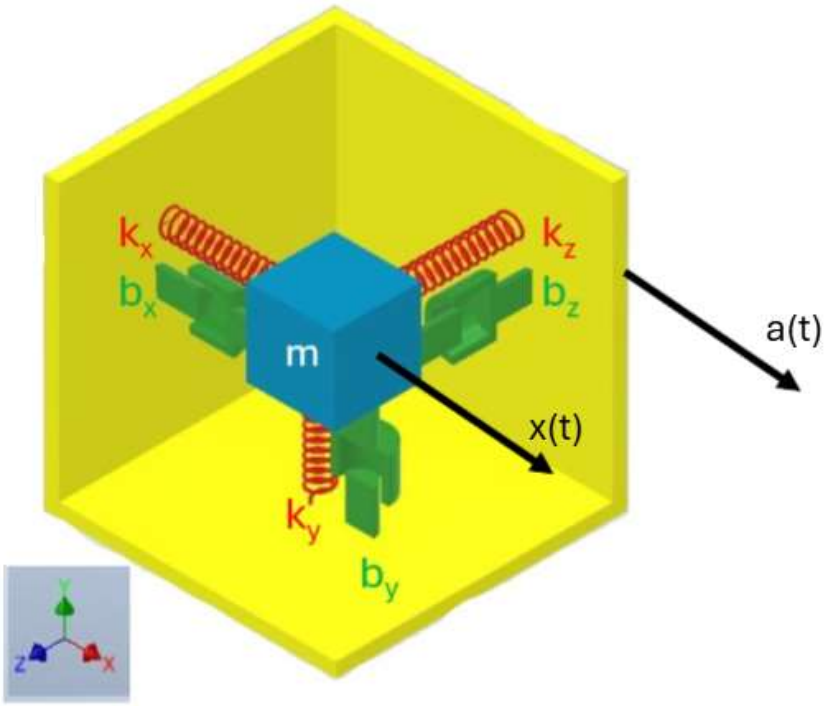
Na podstawie przeprowadzonych badań dynamicznych oraz analizy konstrukcji sensora opracowano matematyczny model uwzględniający możliwość ruchu masy sejsmicznej w kierunkach odpowiadających osiom pomiarowym X, Y oraz Z.

W modelu założono jedną masę sejsmiczną m, połączoną z ramą czujnika za pomocą elementów sprężysto-tłumiących działających niezależnie w każdym z analizowanych kierunków. Właściwości mechaniczne zawieszenia opisano z wykorzystaniem modelu Kelvina–Voigta, reprezentowanego przez równoległe połączenie elementu sprężystego

oraz tłumiącego. Dla każdej osi przyjęto indywidualne wartości sztywności (k_x, k_y, k_z) oraz współczynników tłumienia (b_x, b_y, b_z), wynikające z różnic geometrycznych struktury oraz parametrów materiałowych elementu pomiarowego.

Tłumienie uwzględniono w sposób modelowy jako reprezentację strat energii występujących podczas ruchu struktury. W rzeczywistym czujniku nie występują wydzielone elementy tłumiące, jednak zjawiska związane z tłumieniem materiałowym, oddziaływaniem z otaczającym gazem oraz stratami wewnętrznymi mają wpływ na odpowiedź dynamiczną układu i powinny zostać uwzględnione w modelu.

Na podstawie wyników badań wykonanych z wykorzystaniem systemu Polytec MSA-500 przyjęto brak istotnych sprzężeń pomiędzy osiami pomiarowymi. Pozwoliło to na niezależne rozpatrywanie ruchu wzdłuż każdej z osi oraz uproszczenie opisu matematycznego układu. Schemat opracowanego modelu fizycznego przedstawiono na rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Model fizyczny czujnika MEMS o trzech stopniach swobody

W modelu przyjęto, że wymuszenie układu stanowi ruch podstawy czujnika, natomiast odpowiedź układu wynika z ruchu masy sejsmicznej względem tej podstawy. Dla każdej osi pomiarowej przyjęto niezależny model dynamiczny opisany równaniem

różniczkowym przedstawionym w równaniu 5.5. Model jednowymiarowy rozszerzono na trzy kierunki pomiarowe, przyjmując niezależność odpowiedzi w osiach x, y i z. Założenie to jest zgodne z eksperymentalnie stwierdzonym brakiem sprzężeń międzyosiowych, dzięki czemu macierze sztywności i tłumienia mogą zostać przyjęte w postaci diagonalnej.

Po wprowadzeniu zapisu wektorowego:

$$w = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \tag{5.6.}$$

Macierze sztywności oraz tłumienia w postaci diagonalnej:

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} b_x & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 \\ 0 & 0 & b_z \end{bmatrix} \tag{5.7.}$$

Równanie ruchu przyjmuje postać równania macierzowego:

$$m\ddot{w} + B\dot{w} + Kw = B\dot{a} + Ka \tag{5.8.}$$

gdzie:

m - masa ciała [kg],

K- diagonalna macierz sztywności,

B - diagonalna macierz tłumienia,

w - wektor przemieszczenie ciała [m],

$\ddot{w}$ - wektor przyspieszenie ciała [m/s²],

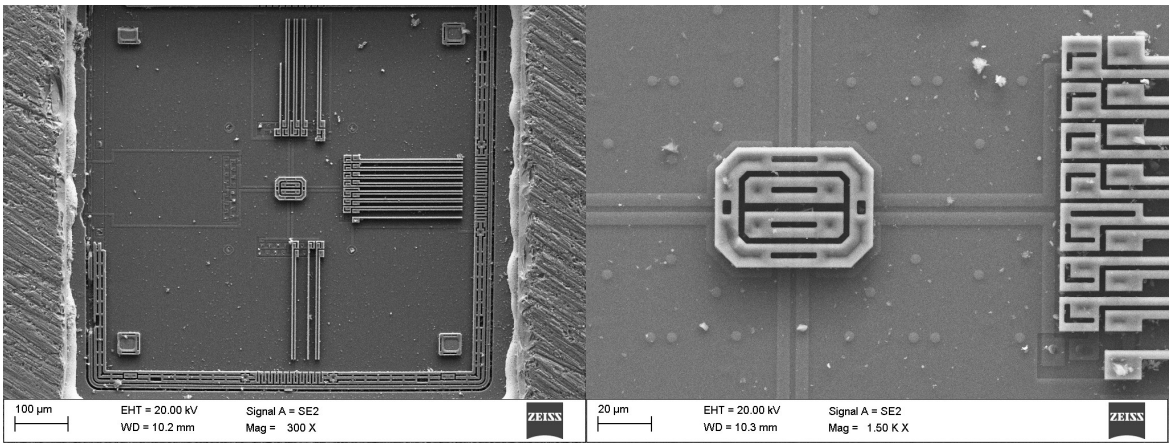
$\dot{w}$ - wektor prędkość ciała [m/s],

a - przemieszczenie obudowy czujnika [m],

$\dot{a}$ - prędkość obudowy czujnika [m/s].

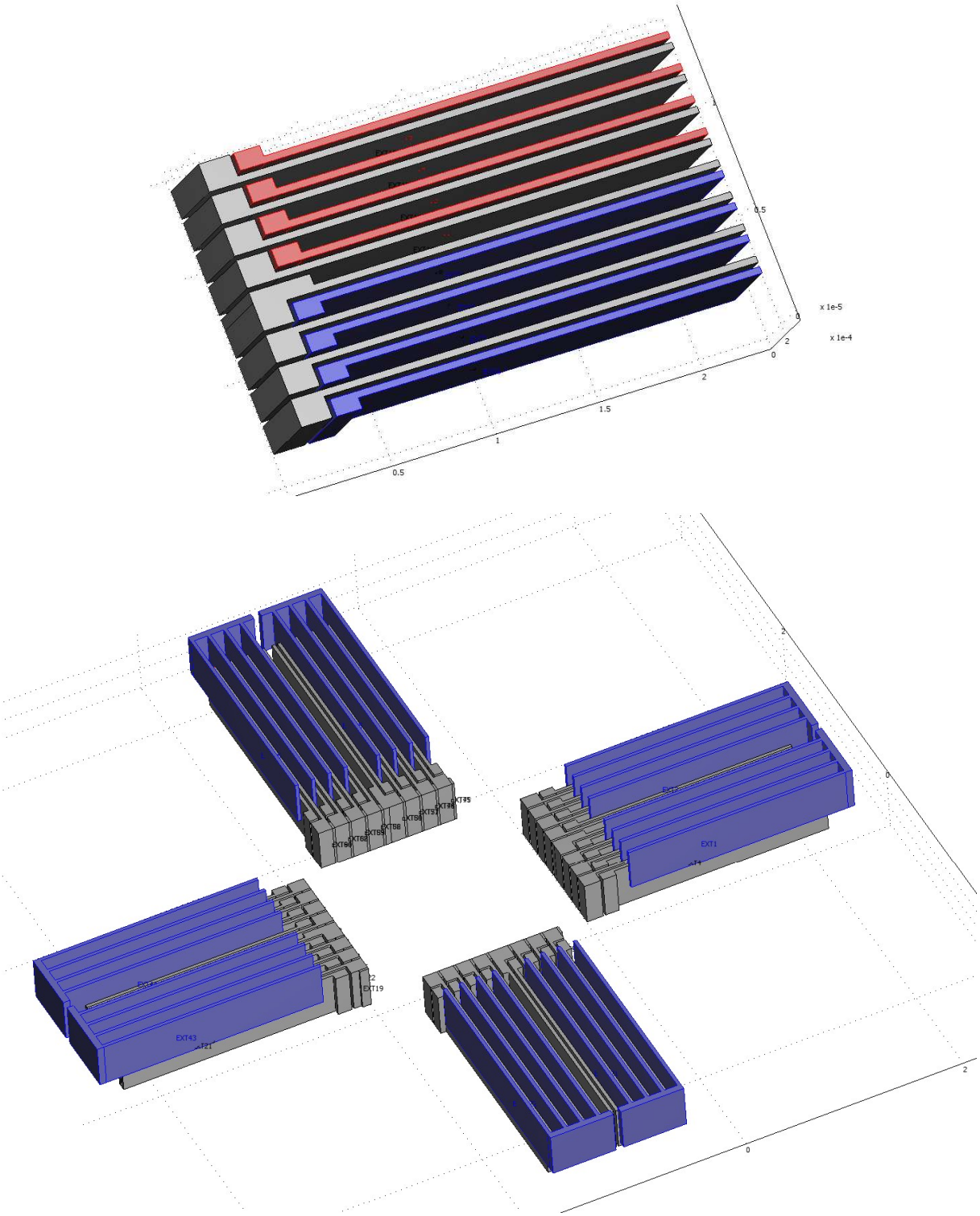
5.3 Modelowanie zjawisk elektrycznych

Model części elektrycznej czujnika MEMS oparto na analizie geometrii struktury krzemowej wyznaczonej na podstawie obrazów SEM. Na tej podstawie określono rozmieszczenie elektrod oraz elementów tworzących układ kondensatorów o zmiennej pojemności.



Rys 5.14. Struktura krzemowa pod mikroskopem

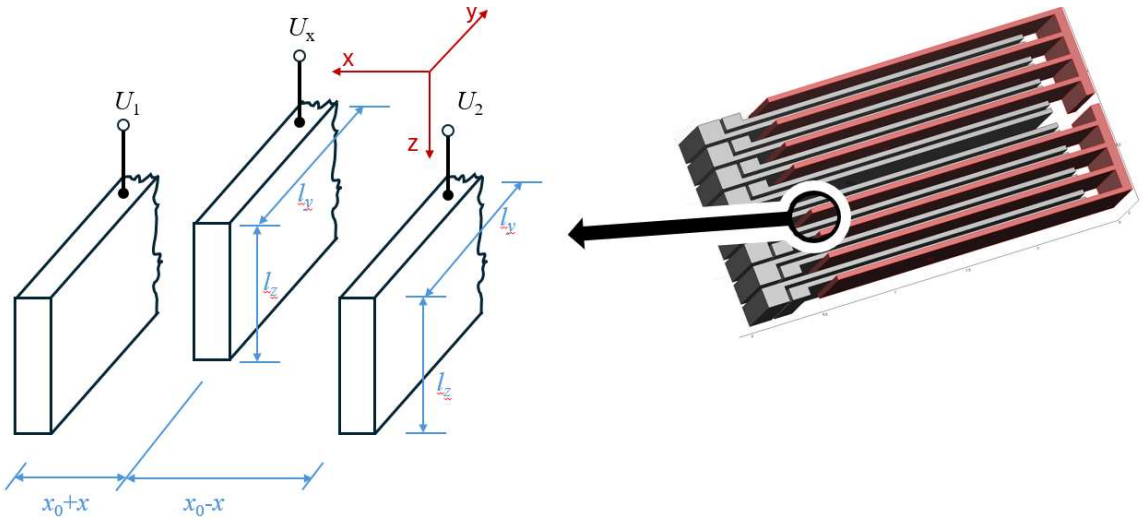
Na podstawie obserwacji struktury opracowano uproszczony model geometryczny odzwierciedlający układ elektrod oraz szczelin powietrznych. Model ten stanowi podstawę do analitycznego opisu zależności pojemności od przemieszczenia masy sejsmicznej.



Rys. 5.15. Model 3D okładzin kondensatorów na podstawie zdjęć mikroskopowych

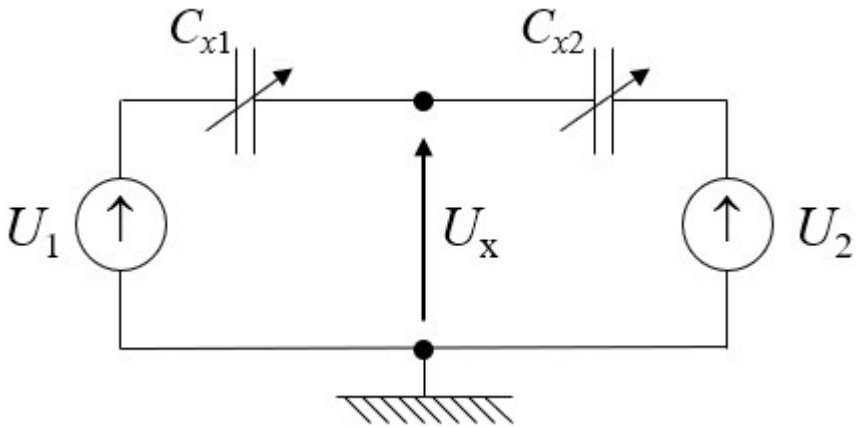
Na podstawie przyjętej geometrii założono, że element pomiarowy można opisać jako zespół równoległych kondensatorów płaskich, których pojemność zmienia się

w funkcji przemieszczenia struktury krzemowej. Zmiana odległości pomiędzy elektrodami, wynikająca z ruchu masy sejsmicznej, prowadzi do bezpośredniej zmiany wartości pojemności.



Rys. 5.16. Geometryczna reprezentacja kondensatora pomiarowego

Na podstawie obrazów SEM opracowano uproszczony model opisujący geometrię pojemnościowego układu pomiarowego czujnika MEMS. W centralnej części struktury zidentyfikowano komórkę pomiarową zawierającą układ elektrod tworzących kondensatory o zmiennej pojemności, odpowiedzialne za detekcję przemieszczeń. Analiza geometrii umożliwiła określenie powierzchni czynnych elektrod oraz odległości pomiędzy nimi, co stanowi podstawę do opisu zależności pojemności od przemieszczenia masy sejsmicznej.



Rys. 5.17. Schemat elektryczny układu kondensatorów pomiarowych

Na rysunku 5.17. przedstawiono schemat elektryczny układu kondensatorów pomiarowych odpowiadających strukturze czujnika MEMS. Zmiana pojemności poszczególnych kondensatorów wynika z przemieszczenia masy sejsmicznej, powodującego zmianę odległości pomiędzy elektrodami.

Zależności opisujące zmienność pojemności w funkcji przemieszczenia przedstawiono w postaci równań:

$$C_{x1} = \frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 - x} \tag{5.9.}$$

$$C_{x2} = \frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 + x} \tag{5.10.}$$

gdzie:

C_{x1}, C_{x2} - pojemności kondensatorów różnicowych [F],

y, z - przemieszczenia ruchomej elektrody w kierunkach osi Y i Z [m],

$½l_y$, $½l_z$ - początkowe szerokości szczelin kondensatorów różnicowych [m],

ε_0 - przenikalność elektryczna próżni [F/m],

ε_r - przenikalność względna ośrodka [-],

x_0 - początkowe położenie elektrody [m],

x - zmiana położenia elektrody względem położenia równowagi [m].

Uwaga: w mianownikach występują różne znaki, ponieważ zmniejszeniu jednej szczeliny kondensatora towarzyszy zwiększenie drugiej.

Przemieszczenie środkowej elektrody w kierunku osi x powoduje zmianę pojemności kondensatorów C_{x1} i C_{x2}, wynikającą ze zmiany odległości pomiędzy elektrodami. Zmiana ta prowadzi do modyfikacji rozkładu napięć w układzie, a w konsekwencji do zmiany napięcia wyjściowego U_x.

Napięcie U_x może być zatem interpretowane jako sygnał proporcjonalny do przemieszczenia. Kondensatory C_{x1} i C_{x2} pełnią w tym układzie funkcję dzielnika napięcia.

Prąd płynący w oczku można opisać wzorem (kondensatory połączone szeregowo):

$$I = \frac{C_{x1}C_{x2}}{C_{x1}+C_{x2}}(U_1 - U_2) \tag{5.11.}$$

Napięcie U_x wyraża się jako suma spadku napięcia na kondensatorze C_{x1} oraz napięcia zasilającego U_1:

$$U_x = U_1 + U_{c1} = U_1 + \frac{1}{C_{x1}}I = U_1 + \frac{1}{C_{x1}}\frac{C_{x1}C_{x2}}{C_{x1}+C_{x2}}(U_1 - U_2) \tag{5.12.}$$

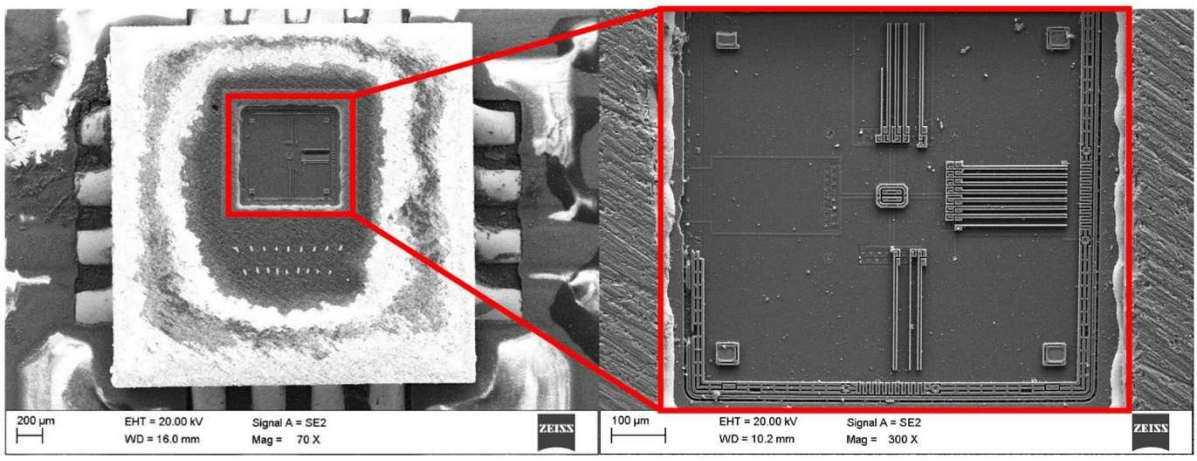
Po przekształceniu uzyskano zależność:

$$U_x = U_1 + \frac{C_{x2}}{C_{x1}+C_{x2}}(U_1 - U_2) \tag{5.13.}$$

Przedstawiony model opisuje pojedynczy segment pomiarowy czujnika MEMS, w którym przemieszczenie elektrody centralnej powoduje przeciwną zmianę pojemności kondensatorów C_{x1}i C_{x2}. Zmiana ta wynika bezpośrednio z modyfikacji odległości pomiędzy elektrodami i stanowi podstawowy mechanizm działania układu pojemnościowego. W zależności od kierunku wychylenia elektrody centralnej jedna z pojemności ulega zwiększeniu, podczas gdy druga maleje, co prowadzi do zmiany rozkładu napięć w układzie. Opracowany opis matematyczny umożliwia wyznaczenie napięcia wyjściowego U_x w funkcji parametrów pojemnościowych oraz przemieszczenia. Uzyskane zależności stanowią podstawę dalszej implementacji modelu w środowisku numerycznym oraz jego integracji z częścią mechaniczną w ujęciu elektromechanicznym.

Analiza własności materiałowych

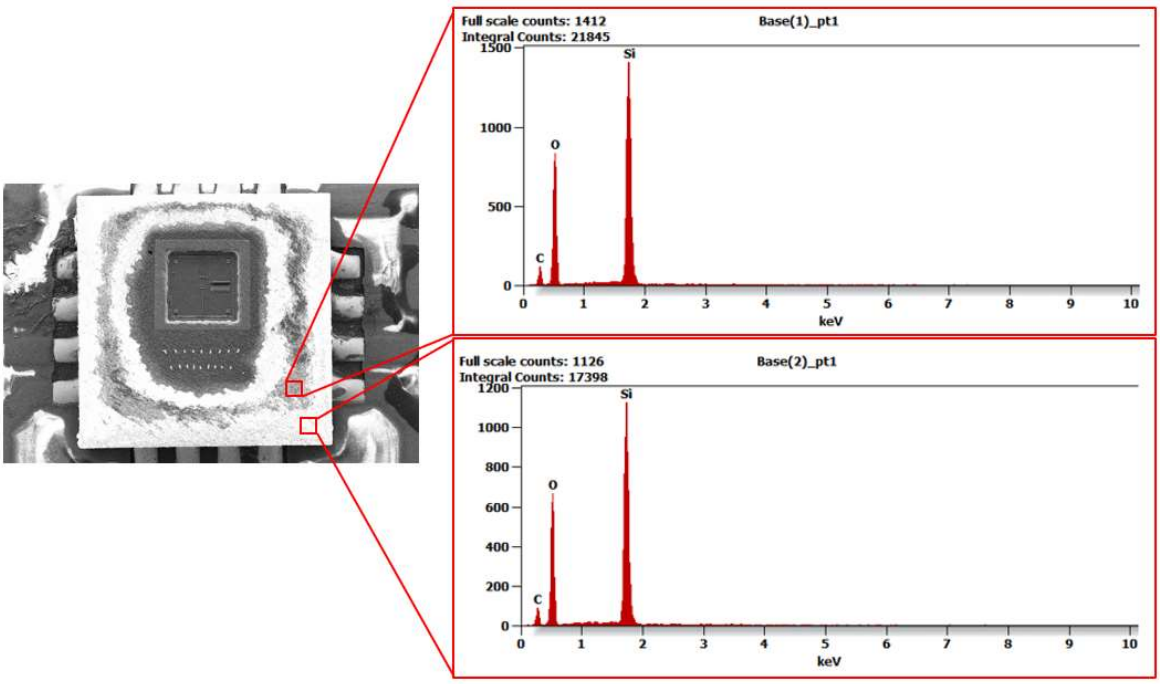
Uzyskane obrazy SEM stanowiły podstawę do dalszej analizy struktury czujnika MEMS, w szczególności w kontekście identyfikacji materiałów wykorzystanych w jego konstrukcji, co było niezbędne na potrzeby opracowania modelu części elektronicznej. Obserwacje geometrii oraz układu poszczególnych elementów zostały uzupełnione o analizę składu chemicznego z wykorzystaniem spektroskopii dyspersyjnej energii promieniowania rentgenowskiego (EDS), realizowanej przy użyciu spektrometru EDAX Trident (XM4, AMETEK Inc., Berwyn, PA, USA). Zastosowanie techniki EDS umożliwiło określenie obecności głównych pierwiastków budujących strukturę czujnika, w szczególności w obrębie odsłoniętych warstw materiałowych oraz obszarów połączeń elektrycznych. Analiza ta miała charakter jakościowy i służyła potwierdzeniu zgodności materiałowej elementów konstrukcyjnych z przyjętymi założeniami modelu, w którym kluczowe znaczenie mają właściwości mechaniczne i elektryczne materiałów. Połączenie informacji geometrycznych uzyskanych z obrazowania SEM z danymi składu chemicznego z analizy EDS pozwoliło na jednoznaczną identyfikację materiałów oraz przypisanie im odpowiednich parametrów fizycznych wykorzystywanych w dalszym modelowaniu. W szczególności umożliwiło to potwierdzenie obecności krzemu jako materiału strukturalnego elementów mikromechanicznych oraz identyfikację warstw przewodzących i izolacyjnych w obrębie czujnika. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do dalszych etapów analizy, w których przyjęto odpowiednie wartości parametrów materiałowych wykorzystywanych w modelu matematycznym czujnika MEMS. Pozyskane informacje ograniczyły niepewność parametrów materiałowych przyjmowanych w modelu.



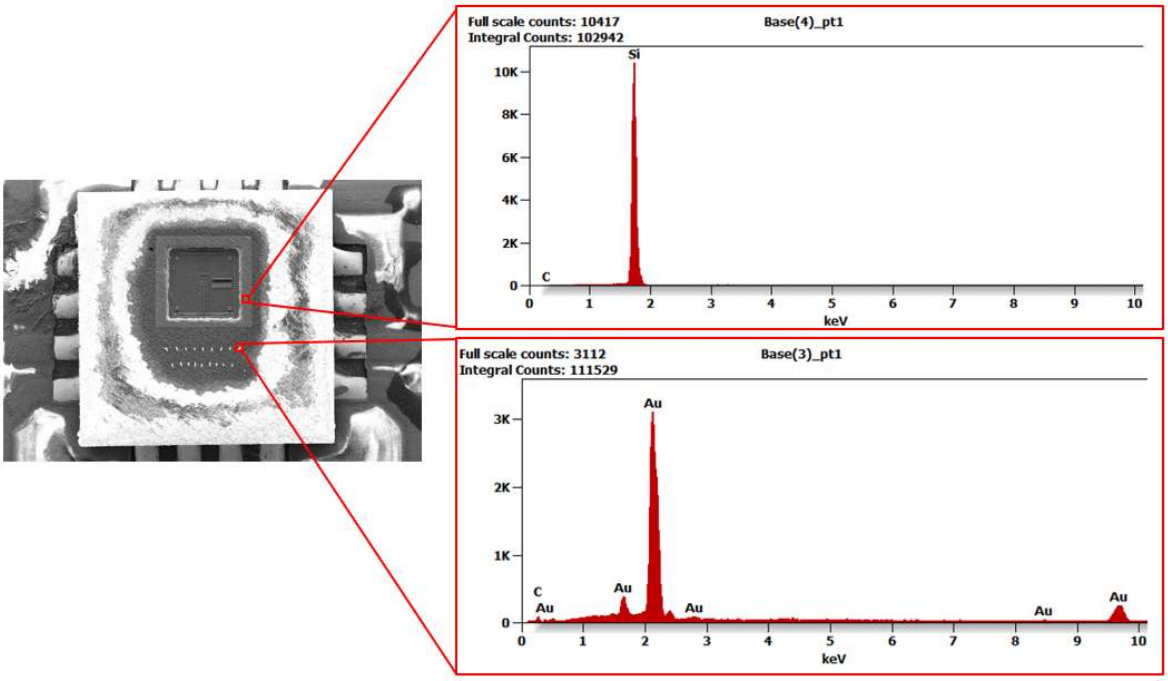
Rys. 5.18. Obrazy SEM przedstawiające powierzchnię otwartego czujnika MEMS

Rysunek 5.18. przedstawia obraz SEM powierzchni otwartego czujnika MEMS, uzyskany po usunięciu warstw obudowy. Widoczne są elementy struktury krzemowej, w tym elektrody oraz fragmenty układu mikromechanicznego. Na powierzchni obserwowane są lokalne uszkodzenia struktury, powstałe w trakcie procesu przygotowania próbki, w szczególności podczas mechanicznego otwierania czujnika. Uszkodzenia te nie wpływają na możliwość identyfikacji geometrii oraz materiału analizowanych elementów, jednak wykluczają dalsze wykorzystanie czujnika w badaniach funkcjonalnych. Uzyskane obrazy stanowią podstawę do dalszej analizy składu chemicznego z wykorzystaniem spektroskopii EDS.

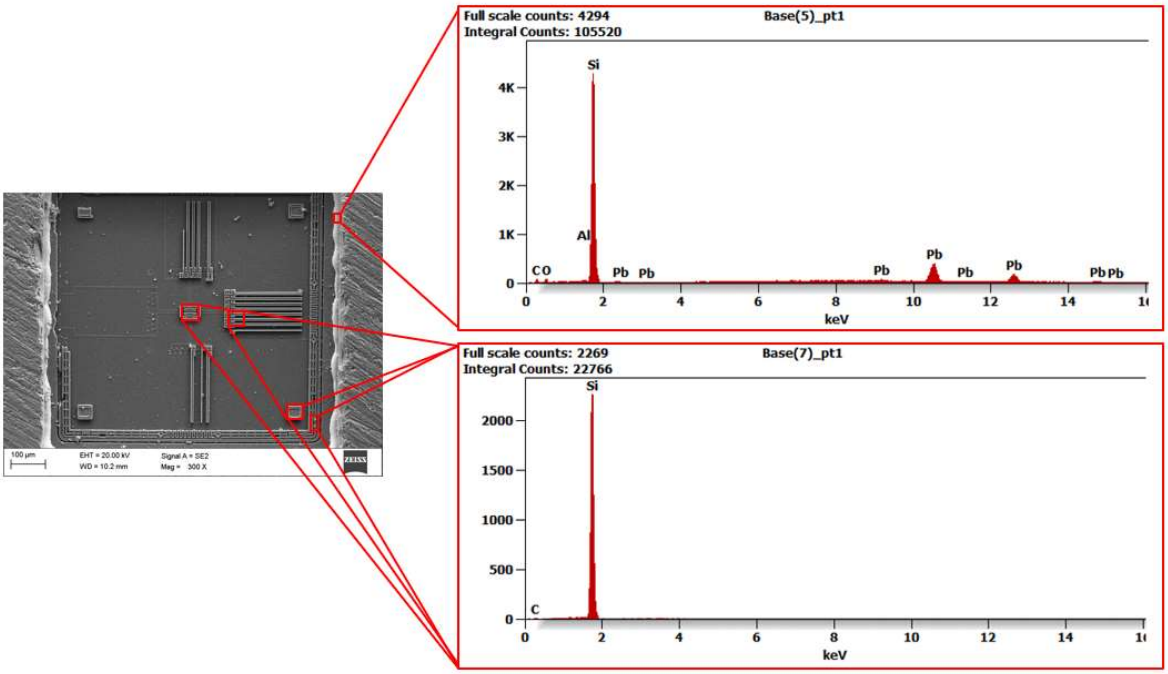
Analizę składu chemicznego przeprowadzono z wykorzystaniem spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS), stanowiącej uzupełnienie obserwacji SEM. Metoda ta umożliwia identyfikację pierwiastków obecnych w analizowanych obszarach próbki na podstawie charakterystycznego widma promieniowania rentgenowskiego. Na rysunkach 5.19.–5.21. przedstawiono wyniki analizy EDS dla wybranych obszarów czujnika, obejmujące lokalizację punktów pomiarowych oraz odpowiadające im widma energetyczne wraz z identyfikacją pierwiastków.



Rys. 5.19. Analiza EDS czujnika MEMS, spektrogram dyspersji energii



Rys. 5.20. Analiza EDS czujnika MEMS, spektrogram dyspersji energii



Rys. 5.21. Analiza EDS odsłoniętej struktury krzemowej czujnika MEMS, spektrogram dyspersji energii

Przeprowadzone badania SEM umożliwiły identyfikację geometrii oraz rozmieszczenia elementów struktury krzemowej czujnika MEMS. Obserwacje te stanowiły podstawę do określenia parametrów geometrycznych wykorzystywanych w modelu. Analiza składu chemicznego metodą EDS pozwoliła na identyfikację głównych pierwiastków obecnych w strukturze czujnika. Potwierdzono obecność krzemu jako podstawowego materiału elementów mikromechanicznych oraz zidentyfikowano warstwy przewodzące w obszarach połączeń elektrycznych. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do przyjęcia parametrów materiałowych oraz geometrycznych w dalszym modelowaniu mechanicznym i elektromechanicznym czujnika.

5.4 Matematyczny model zjawisk elektromechanicznych

Zjawiska mechaniczne w modelu opisano równaniem ruchu masy sejsmicznej z uwzględnieniem sprężystości i tłumienia, przedstawionym w podrozdziale 5.1 (równanie 5.5.). Równanie to opisuje zależność pomiędzy przemieszczeniem, prędkością i przyspieszeniem masy, z parametrami sztywności $k$oraz tłumienia b:

$$\ddot{x} = \frac{k(a - x)}{m} + \frac{b(\dot{a} - \dot{x})}{m}$$

W celu wyznaczenia przemieszczenia na podstawie zadanego przebiegu przyspieszenia wykonano dwukrotną całkę względem czasu. Pierwsze całkowanie prowadzi do wyznaczenia prędkości, natomiast drugie do określenia przemieszczenia. Ostatecznie zależność przyjmuje postać:

$$x = \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{1}{m}\big(k * \Delta x(t_2) + b * \Delta\dot{x}(t_2)\big)dt_2\, dt_1 + v_0 t + x_0 \qquad (5.14.)$$

gdzie:
$\Delta\dot{x}(s) = \dot{a}(t) - \dot{x}(t)$,
$\Delta x(s) = a(t) - x(t)$,
v_0 - początkowe przemieszczenie,
x_0 - początkowa prędkość.

Model części elektrycznej oparto na zależnościach opisujących zmienność pojemności kondensatorów w funkcji przemieszczenia, przedstawionych w podrozdziale 5.3 (równania 5.9. oraz 5.10.):

$$C_{x1} = \frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 - x}$$

$$C_{x2} = \frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 + x}$$

Poprzez podstawienie zależności opisującej przemieszczenie (5.14.) do równań pojemności kondensatorów (5.9., 5.10.), uzyskano model elektromechaniczny czujnika,

uwzględniający zależność pomiędzy wymuszeniem mechanicznym a odpowiedzią elektryczną:

$$C_{x1/x2}\frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 \pm x = \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{1}{m}\left(k * \Delta x(t_2) + b * \Delta\dot{x}(t_2)\right)dt_2\, dt_1 + v_0 t + x_0} \quad (5.15.)$$

Po podstawieniu otrzymanych zależności do równania opisującego napięcie wyjściowe (5.13.), uzyskano rozwiniętą postać modelu:

$$U_x = U_1 + \frac{\frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 + x = \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{1}{m}\left(k*\Delta x(t_2) + b*\Delta\dot{x}(t_2)\right)dt_2\, dt_1 + v_0 t + x_0}}{\frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 - x = \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{1}{m}\left(k*\Delta x(t_2) + b*\Delta\dot{x}(t_2)\right)dt_2\, dt_1 + v_0 t + x_0} + \frac{\left(\frac{1}{2}l_y - y\right)\left(\frac{1}{2}l_z - z\right)\varepsilon_0\varepsilon_r}{x_0 + x = \int_0^t \int_0^{t_1} \frac{1}{m}\left(k*\Delta x(t_2) + b*\Delta\dot{x}(t_2)\right)dt_2\, dt_1 + v_0 t + x_0}}(U_1 - U_2) \quad (5.16.)$$

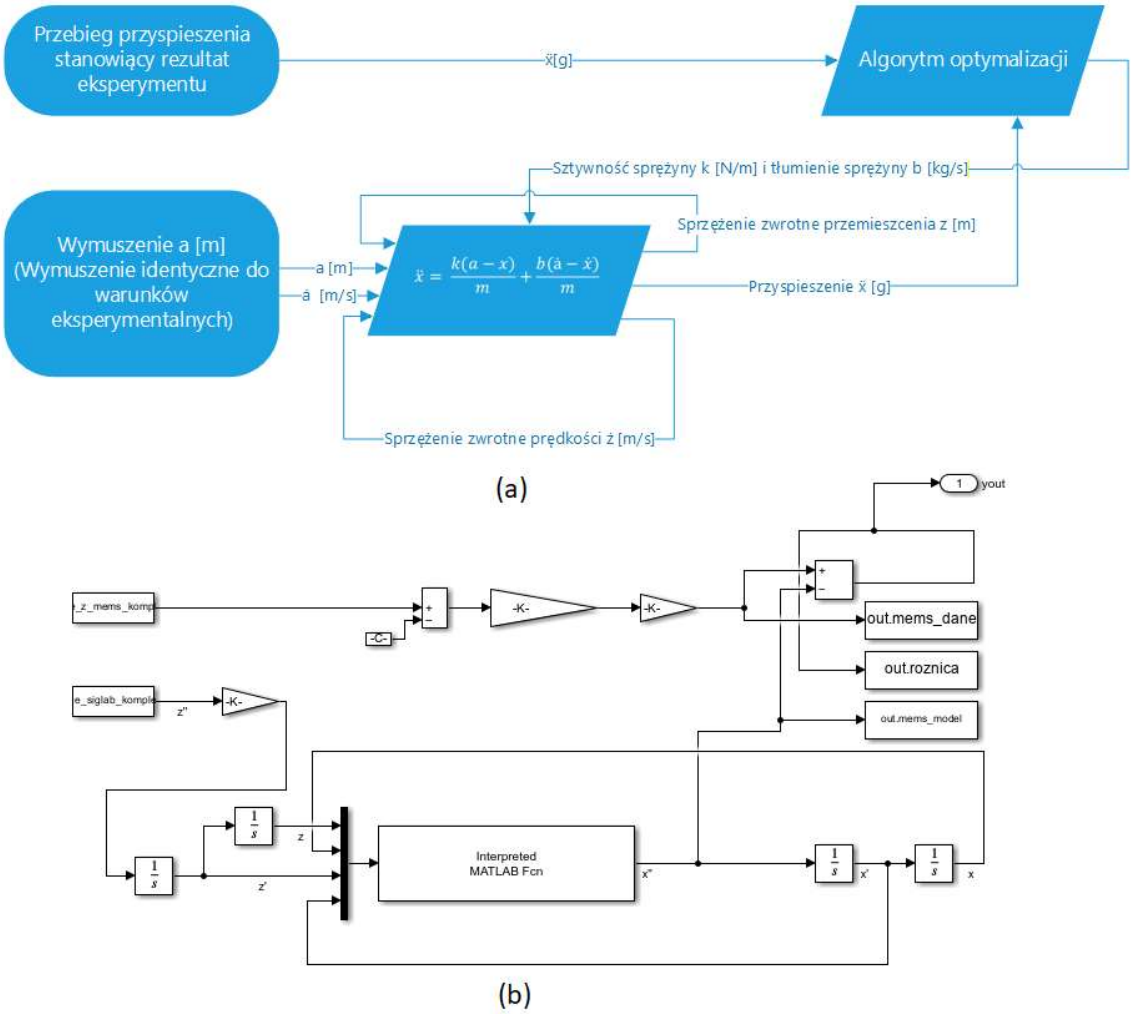
Otrzymane równanie stanowi rozwiniętą postać matematyczną modelu zjawisk elektromechanicznych, opisującą zależność pomiędzy przyspieszeniem przyłożonym do obudowy a napięciem wyjściowym czujnika. Model zaimplementowano w środowisku MATLAB/Simulink, gdzie parametry mechaniczne i elektryczne zwalidowano na podstawie danych eksperymentalnych. Model umożliwia opis odpowiedzi czujnika na dowolny przebieg wymuszenia.

6. Model numeryczny czujnika MEMS

Model numeryczny czujnika MEMS opracowano w celu odwzorowania jego odpowiedzi na impulsowe oddziaływania mechaniczne, z uwzględnieniem zarówno charakterystyki struktury nośnej, jak i działania sensora pojemnościowego. Podejście to umożliwia analizę pełnej ścieżki pomiarowej – od deformacji mikrostruktury do uzyskania sygnału wyjściowego. Ze względu na bardzo krótki czas trwania analizowanych zjawisk oraz wysokie wartości przyspieszeń konieczne było zastosowanie systemu rejestracji danych o wysokiej częstotliwości próbkowania, rzędu 100 kHz. Wymaganie to wynika bezpośrednio z charakteru impulsów, dla których standardowe rozwiązania pomiarowe okazują się niewystarczające. Budowa modelu numerycznego wymagała pozyskania danych eksperymentalnych, w szczególności przebiegów przyspieszeń o wysokiej rozdzielczości czasowej. W tym celu opracowano dedykowany układ akwizycji danych, zapewniający bezpośrednią współpracę z czujnikiem oraz uproszczoną konfigurację pomiarów w porównaniu z rozwiązaniami standardowymi. Szczegóły dotyczące systemu rejestracji przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

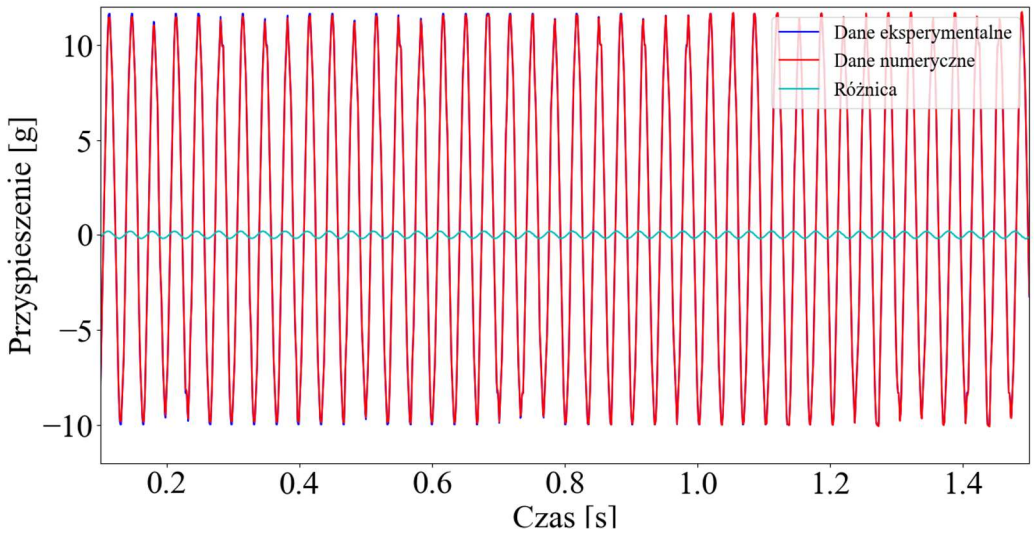
Model numeryczny części mechanicznej

Część mechaniczna modelu opracowano w oparciu o uproszczony układ masowo-sprężynowy, opisujący dynamiczne zachowanie krzemowej struktury MEMS pod wpływem wymuszeń zewnętrznych. Weryfikację i kalibrację tego segmentu przeprowadzono na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych w testach z użyciem wzbudnika harmonicznego (oscylatora). Na tej podstawie dobrano parametry modelu, w szczególności sztywność oraz współczynnik tłumienia, tak, aby odwzorować rzeczywistą odpowiedź dynamiczną układu. Na rysunku 6.1.a przedstawiono schemat blokowy opracowanego modelu zjawisk elektromechanicznych, natomiast rysunek 6.1.b przedstawia implementację modelu w środowisku MATLAB/Simulink.



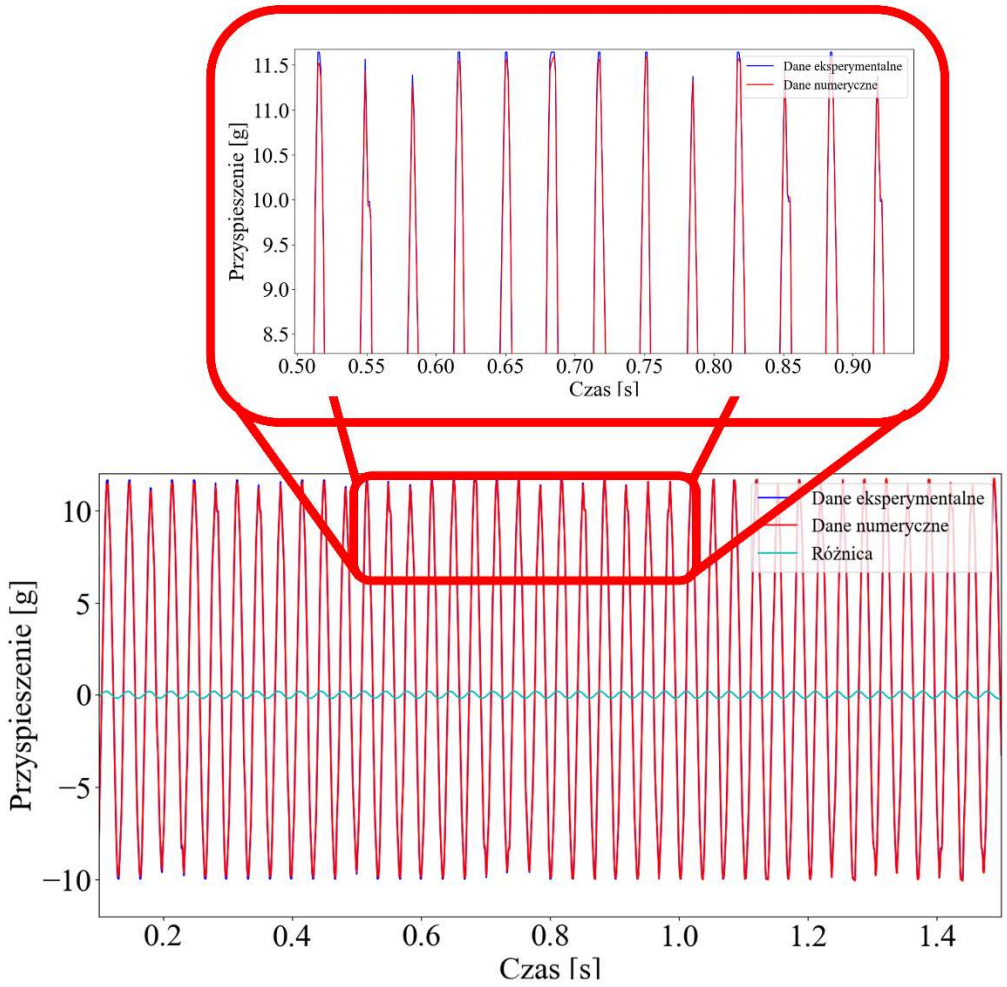
Rys. 6.1. Schemat modelu numerycznego w środowisku MATLAB Simulink

Poniżej przedstawiono wykres (Rys. 6.2.) uzyskany po optymalizacji parametrów mechanicznego modelu numerycznego. Dobór parametrów prowadzono iteracyjnie z wykorzystaniem narzędzi optymalizacyjnych środowiska MATLAB. W każdej iteracji porównywano przebieg odpowiedzi z wynikami pomiaru doświadczalnego. Sygnały wejściowe do modelu pochodziły z czujników referencyjnych, co zapewniło zgodność warunków wymuszenia z rzeczywistymi oraz wysoką zgodność między wynikami symulacji numerycznych a sygnałami badań eksperymentalnych.



Rys. 6.2. Porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami badań doświadczalnych

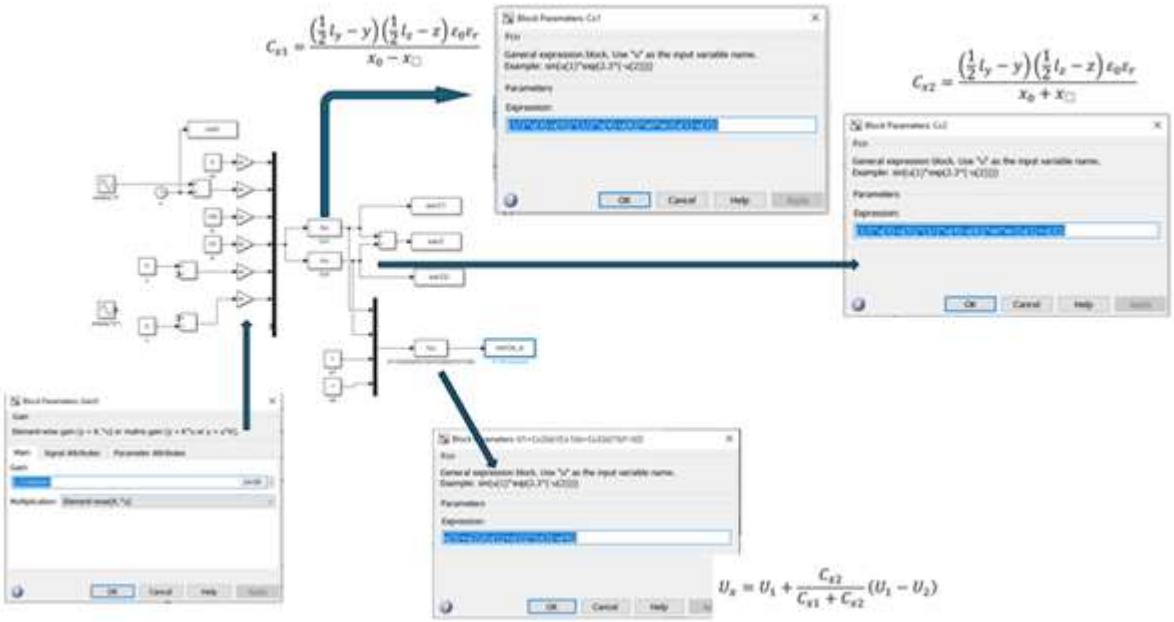
Poniżej przedstawiono (Rys. 6.3.) fragment wykresu (Rys. 6.2.), umożliwiający szczegółową ocenę zgodności między wynikami symulacji a danymi pomiarowymi. Różnice mają niewielką amplitudę i występują głównie w obszarach maksimów sygnału oraz w momentach gwałtownych zmian nachylenia przebiegu. Ich źródłem może być przyjęty krok czasowy symulacji oraz ograniczenia interpolacji danych. Mimo to uzyskano wysoką zgodność przebiegów, co potwierdza poprawne odwzorowanie odpowiedzi dynamicznej układu przez model.



Rys. 6.3. Zbliżenie porównania danych z eksperymentu z modelem czujnika MEMS

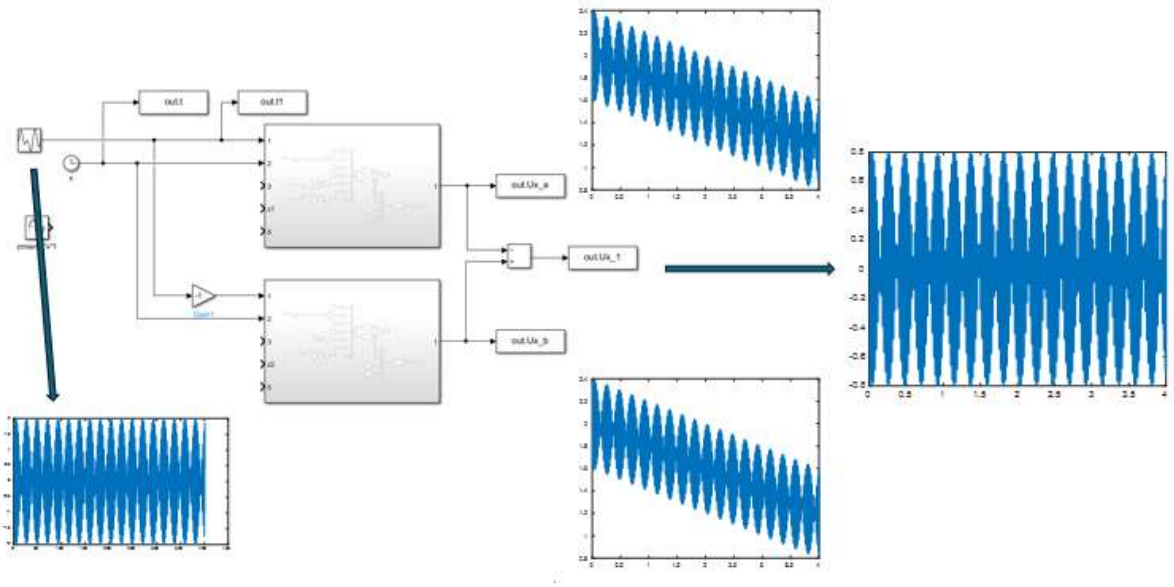
Model numeryczny części elektrycznej

Część elektryczna modelu opisuje działanie toru pomiarowego opartego na kondensatorach o zmiennej pojemności, zintegrowanych w krzemowej strukturze czujnika. W wyniku względnego przemieszczenia elektrod, spowodowanego odkształceniami mechanicznymi, następuje zmiana pojemności układu, przekształcana następnie w sygnał napięciowy. Model uwzględnia zależności geometryczne, które umożliwiają odwzorowanie deformacji struktury w odpowiadający jej sygnał elektryczny.



Rys. 6.4. Model numeryczny pojedynczego kondensatora o zmiennej pojemności opracowany w środowisku MATLAB Simulink

Przedstawiony model (Rys. 6.4.) stanowi odwzorowanie pojedynczego kondensatora wchodzącego w skład struktury czujnika MEMS. Uwzględnia zmianę odległości pomiędzy elektrodami wynikającą z działania siły mechanicznej, co bezpośrednio przekłada się na zmianę pojemności. Strukturę modelu dostosowano do integracji z częścią mechaniczną, co umożliwia analizę zależności pomiędzy przemieszczeniem a odpowiedzią elektryczną. Model zaimplementowano w środowisku MATLAB Simulink, co ułatwia dalsze dostrajanie parametrów.



Rys. 6.5. Model numeryczny układu dwóch sprzężonych kondensatorów równoważących – konfiguracja odwzorowująca symetryczną strukturę pomiarową

Model (Rys. 6.5.) przedstawia układ dwóch przeciwstawnie pracujących kondensatorów, odpowiadający rzeczywistej symetrycznej strukturze pomiarowej czujnika. Taka konfiguracja umożliwia generację sygnału różnicowego, który charakteryzuje się większą odpornością na zakłócenia oraz wyższą stabilnością pomiaru. Model w środowisku Simulink odwzorowuje zmiany pojemności wynikające z przemieszczeń wewnętrznego elementu czujnika. Integracja z pozostałymi blokami modelu pozwala na przeprowadzenie kompleksowych symulacji odpowiedzi elektromechanicznej systemu.

Model numeryczny elektromechaniczny

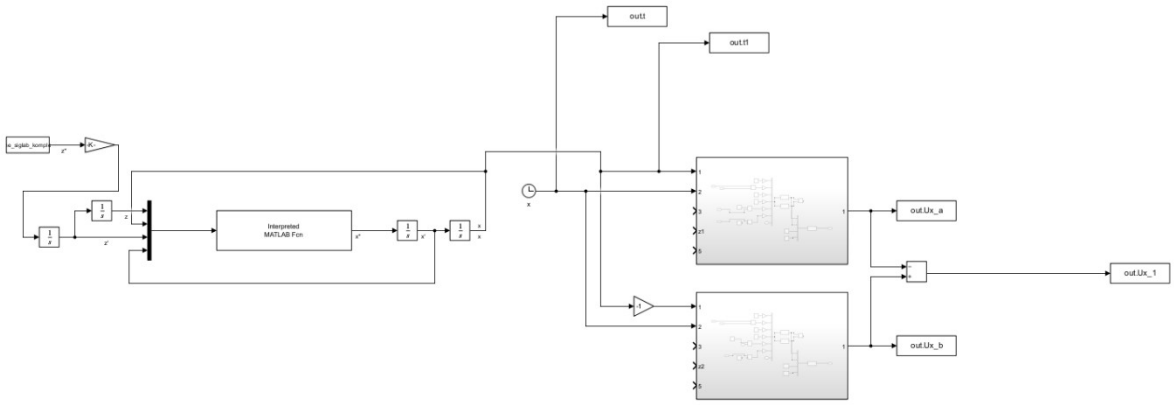
Model uwzględnia odpowiedź dynamiczną struktury oraz sposób przetwarzania jej przemieszczeń na sygnał napięciowy, co umożliwia wyznaczenie odpowiedzi układu dla zadanego wymuszenia mechanicznego. Opracowany model stanowi podstawę do porównania z danymi eksperymentalnymi, zarówno pod względem amplitud,

jak i przebiegów czasowych, a także umożliwia analizę wpływu wybranych parametrów na działanie układu.



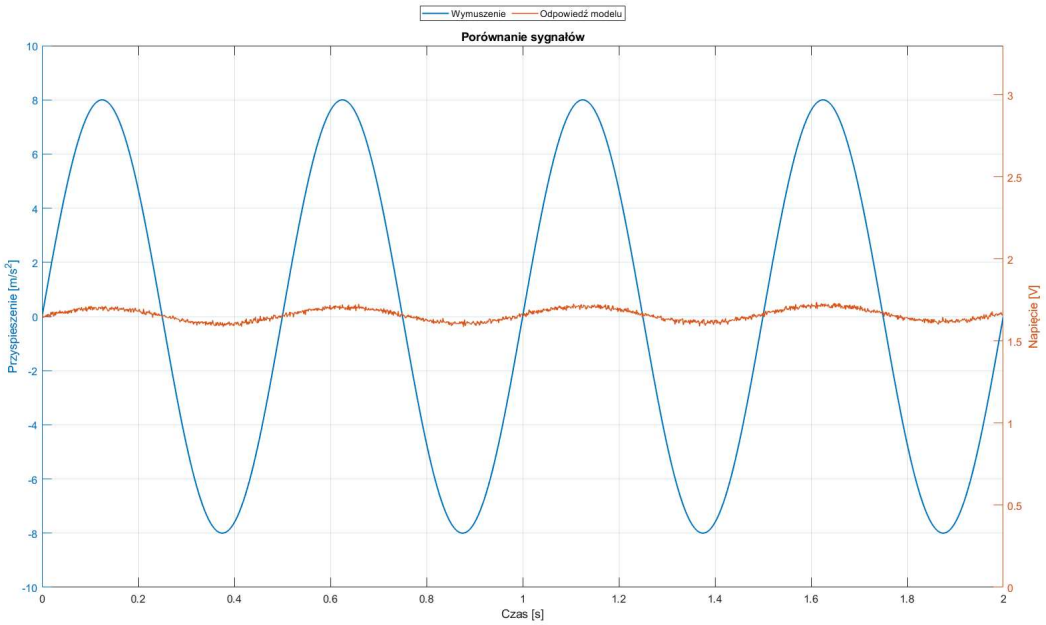
Rys. 6.6. Schemat blokowy modelu elektromechanicznego

Schemat (Rys. 6.6.) przedstawia strukturę modelu i sprzężenie pomiędzy częścią opisującą zjawiska mechaniczne i elektroniczne. Tak zdefiniowany model odwzorowuje podstawowy mechanizm działania czujnika MEMS, łącząc odpowiedź dynamiczną struktury z generowanym sygnałem wyjściowym.



Rys. 6.7. Model numeryczny w środowisku MATLAB Simulink

Na podstawie przedstawionego schematu opracowano model numeryczny (Rys. 6.7.) w środowisku MATLAB/Simulink. Implementacja odwzorowuje zależność pomiędzy wymuszeniem mechanicznym, przemieszczeniem elementu ruchomego oraz sygnałem napięciowym na wyjściu układu. Model umożliwia symulację odpowiedzi układu dla zadanych warunków oraz analizę przebiegów czasowych i wartości maksymalnych sygnału.



Rys. 6.8. Przebieg sygnałów wejścia i wyjścia modelu numerycznego

Na rysunku 6.8. przedstawiono przykładowy przebieg odpowiedzi modelu elektromechanicznego dla zadanego wymuszenia. Pomimo rozszerzenia modelu o opis zjawisk elektrotechnicznych, wprowadzającą dodatkowe zależności nieliniowe oraz zwiększoną liczbę parametrów, uzyskane wyniki wykazują wysoką zgodność z przebiegami referencyjnymi. W szczególności, mimo obecności opóźnień wynikających z przetwarzania sygnału oraz potencjalnej kumulacji błędów numerycznych w trakcie symulacji, model zachowuje poprawną charakterystykę amplitudową i czasową.

Wnioski

W ramach badań opracowano system pomiarowy, przeprowadzono eksperymenty laboratoryjne i terenowe, wykonano analizy numeryczne oraz opracowano model elektromechaniczny wybranego typu czujnika MEMS.

Przeprowadzone badania wykazały, że opracowany system akwizycji danych umożliwia rejestrację szybkozmiennych sygnałów dynamicznych generowanych podczas oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu. Uzyskana częstotliwość próbkowania wynosząca 100 kHz pozwoliła na poprawne odwzorowanie krótkotrwałych impulsów przyspieszenia oraz analizę odpowiedzi dynamicznej badanej struktury.

Badania eksperymentalne potwierdziły możliwość wykorzystania akcelerometrów MEMS do rejestracji odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych obciążeniom impulsowym. Uzyskane wyniki wskazują na istnienie zależności pomiędzy parametrami fali uderzeniowej a amplitudami przyspieszeń rejestrowanych przez czujnik MEMS zamocowany na badanej konstrukcji.

Opracowany model numeryczny w środowisku LS-DYNA umożliwił poprawne odwzorowanie odpowiedzi dynamicznej analizowanego układu. Porównanie wyników eksperymentalnych z rezultatami symulacji wykazało dobrą zgodność zarówno dla modelu Friedlandera, jak i metody CONWEP, potwierdzając poprawność przyjętych założeń modelowych w analizie oddziaływania mikroskalowych ładunków wybuchowych.

Przeprowadzona identyfikacja struktury czujnika MEMS pozwoliła na określenie jego parametrów geometrycznych, materiałowych oraz dynamicznych. Wykorzystanie metod tomografii komputerowej, interferometrii optycznej, mikroskopii elektronowej SEM, analizy EDS oraz pomiarów wibrometrycznych umożliwiło opracowanie modelu odzwierciedlającego rzeczywistą budowę sensora.

Opracowany model mechaniczny, elektryczny i elektromechaniczny czujnika MEMS został zweryfikowany eksperymentalnie. Uzyskana zgodność odpowiedzi modelu

z wynikami pomiarów potwierdziła zasadność przyjętego sposobu opisu sensora i jego przydatność do analizy zjawisk impulsowych.

Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości dynamiczne sensora MEMS mają istotny wpływ na przebieg i interpretację rejestrowanych sygnałów. Oznacza to, że prawidłowa analiza odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wymaga uwzględnienia parametrów dynamicznych czujnika oraz ich wpływu na kształt sygnału wyjściowego.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że mikroelektromechaniczne akcelerometry MEMS mogą stanowić skuteczne narzędzie do rejestracji i analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wybuchu, pod warunkiem uwzględnienia właściwości dynamicznych sensora opisanych zweryfikowanym modelem elektromechanicznym.

Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania czujników MEMS do analizy zjawisk impulsowych związanych z oddziaływaniem fali uderzeniowej na struktury mechaniczne.

Podsumowanie

Przedmiotem rozprawy było zastosowanie mikroelektromechanicznych układów sensorycznych MEMS do identyfikacji oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na struktury mechaniczne. Problem badawczy obejmował zarówno zagadnienia związane z rejestracją szybkozmiennych zjawisk dynamicznych, jak również analizę wpływu właściwości samego sensora na interpretację uzyskiwanych wyników pomiarowych.

W ramach realizacji pracy opracowano autorski system akwizycji danych przeznaczony do współpracy z akcelerometrem MEMS. Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz terenowe potwierdziły możliwość wykorzystania opracowanego rozwiązania do rejestracji krótkotrwałych impulsów dynamicznych generowanych podczas oddziaływania fali wybuchowej. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do oceny odpowiedzi dynamicznej badanej konstrukcji oraz walidacji modeli numerycznych.

Istotnym elementem pracy było opracowanie modelu numerycznego oddziaływania wybuchu w środowisku LS-DYNA. Przeprowadzone obliczenia umożliwiły analizę propagacji fali uderzeniowej oraz odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Porównanie wyników uzyskanych eksperymentalnie i numerycznie wykazało dobrą zgodność zastosowanych modeli obciążenia z rzeczywistym przebiegiem badanego zjawiska.

Oryginalnym elementem rozprawy była identyfikacja rzeczywistej struktury badanego czujnika MEMS oraz opracowanie jego modelu mechanicznego, elektrycznego i elektromechanicznego. Wykorzystanie badań strukturalnych, materiałowych i dynamicznych pozwoliło na określenie parametrów niezbędnych do opisu pracy sensora oraz analizę wpływu jego właściwości dynamicznych na rejestrowane sygnały.

Przeprowadzona walidacja wykazała, że opracowany model elektromechaniczny umożliwia poprawne odwzorowanie odpowiedzi badanego czujnika w warunkach wymuszeń impulsowych charakterystycznych dla oddziaływania fali uderzeniowej. Uzyskane wyniki potwierdziły, że właściwości dynamiczne sensora stanowią istotny czynnik wpływający na interpretację wyników pomiarowych i powinny być uwzględniane podczas analizy odpowiedzi dynamicznej konstrukcji.

Wyniki badań potwierdziły przyjętą tezę rozprawy, zgodnie z którą mikroelektromechaniczne akcelerometry MEMS mogą być wykorzystywane do rejestracji i analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wybuchu, pod warunkiem uwzględnienia właściwości dynamicznych sensora opisanych zweryfikowanym modelem elektromechanicznym.

Uzyskane rezultaty stanowią podstawę do dalszych badań nad wykorzystaniem czujników MEMS w diagnostyce konstrukcji poddawanych obciążeniom impulsowym, walidacji modeli oddziaływań wybuchowych oraz rozwoju kompaktowych systemów monitorowania zjawisk dynamicznych w zastosowaniach inżynierskich i bezpieczeństwa technicznego.

Bibliografia

1. Niu, W., Fang, L., Xu, L., Li, X., Huo, R., Guo, D., Qi, Z., Niu, W., Fang, L., Xu, L., Li, X., Huo, R., Guo, D., & Qi, Z. (2018). Summary of Research Status and Application of MEMS Accelerometers. *Journal of Computer and Communications*, *6* (12), 215–221. https://doi.org/10.4236/JCC.2018.612021
2. Varanis, M., Silva, A., Mereles, A., & Pederiva, R. (2018). MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *40* (11), 1–18. https://doi.org/10.1007/S40430-018-1445-5/METRICS
3. Dusarlapudi*, K., Raju, K. N., M, P., & Sastry, A. (2019). Genesis of MEMS Accelerometers for Select the Optimal Accelerometer for Bio Applications. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *9* (2), 4962–4970. https://doi.org/10.35940/IJITEE.B9076.129219
4. Kavitha, S., Joseph Daniel, R., & Sumangala, K. (2016). High performance MEMS accelerometers for concrete SHM applications and comparison with COTS accelerometers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *66–67*, 410–424. https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2015.06.005
5. D'Alessandro, A., Scudero, S., & Vitale, G. (2019). A Review of the Capacitive MEMS for Seismology. *Sensors 2019, Vol. 19, Page 3093*, *19* (14), 3093. https://doi.org/10.3390/S19143093
6. Albarbar, A., Mekid, S., Starr, A., & Pietruszkiewicz, R. (2008). Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study. *Sensors 2008, Vol. 8, Pages 784-799*, *8* (2), 784–799. https://doi.org/10.3390/S8020784
7. Edalatfar, F., Yaghootkar, B., Qureshi, A. Q. A., Azimi, S., & Bahreyni, B. (2016). Design, fabrication and characterization of a high performance MEMS accelerometer. *Proceedings of IEEE Sensors*, *0*. https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808650
8. Szermer, M., Zając, P., Amrozik, P., Maj, C., Jankowski, M., Jabłoński, G., Kiełbik, R., Nazdrowicz, J., Napieralska, M., & Sakowicz, B. (2021). A Capacitive 3-Axis MEMS Accelerometer for Medipost: A Portable System Dedicated to Monitoring Imbalance Disorders. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 3564*, *21* (10), 3564. https://doi.org/10.3390/S21103564
9. Wang, T. (2024). Summary of MEMS Capacitive Accelerometer. *Advances in Engineering Technology Research*, *11* (1), 672–672. https://doi.org/10.56028/AETR.11.1.672.2024
10. Lainé, J., & Mougenot, D. (2014). A high-sensitivity MEMS-based accelerometer. *Https://Doi.Org/10.1190/Tle33111234.1*, *33* (11), 1234–1242. https://doi.org/10.1190/TLE33111234.1
11. Mustafazade, A., Pandit, M., Zhao, C., Sobreviela, G., Du, Z., Steinmann, P., Zou, X., Howe, R. T., & Seshia, A. A. (2020). A vibrating beam MEMS accelerometer for gravity and seismic measurements. *Scientific Reports 2020 10:1*, *10* (1), 1–8. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67046-x
12. Wang, S., Wei, X., Zhao, Y., Jiang, Z., & Shen, Y. (2018). A MEMS resonant accelerometer for low-frequency vibration detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, *283*, 151–158. https://doi.org/10.1016/J.SNA.2018.09.055
13. Xu, L., Wang, S., Jiang, Z., & Wei, X. (2020). Programmable synchronization enhanced MEMS resonant accelerometer. *Microsystems and Nanoengineering*, *6* (1), 1–10. https://doi.org/10.1038/S41378-020-0170-2

14. Li, C., Yang, B., Zheng, X., Guo, X., Sun, Z., Zhou, L. & Huang, X. (2022). 2 ng/√Hz-resolution optomechanical accelerometer employing a three-dimensional MEMS interferometer. *Optics Letters, Vol. 47, Issue 7, Pp. 1883-1886*, *47* (7), 1883–1886. https://doi.org/10.1364/OL.452685
15. Li, X., Zheng, Y., Kong, X., Liu, Y., & Tang, D. (2020). Research on High-Resolution Miniaturized MEMS Accelerometer Interface ASIC. *Sensors 2020, Vol. 20, Page 7280*, *20* (24), 7280. https://doi.org/10.3390/S20247280
16. Pagliano, S., Marschner, D. E., Maillard, D., Ehrmann, N., Stemme, G., Braun, S., Villanueva, L. G., & Niklaus, F. (2022). Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer. *Microsystems and Nanoengineering*, *8* (1), 1–11. https://doi.org/10.1038/S41378-022-00440-9
17. Frosio, I., Pedersini, F., & Borghese, N. A. (2009). Autocalibration of MEMS accelerometers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *58* (6), 2034–2041. https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2006137
18. Ejeian, F., Azadi, S., Razmjou, A., Orooji, Y., Kottapalli, A., Ebrahimi Warkiani, M., & Asadnia, M. (2019). Design and applications of MEMS flow sensors: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, *295*, 483–502. https://doi.org/10.1016/J.SNA.2019.06.020
19. Asri, M. I. A., Hasan, M. N., Fuaad, M. R. A., Yunos, Y. M., & Ali, M. S. M. (2021). MEMS Gas Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, *21* (17), 18381–18397. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3091854
20. Yan, W., Liu, Y., Bai, Y., Chen, Y., Zhou, H., & Ahmad, W. (2024). Intelligent MEMS Sensor Based on an Oxidized Medium-Entropy Alloy (FeCoNi) for H2 and CO Recognition. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *16* (37), 49474–49483. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.4C07782/SUPPL_FILE/AM4C07782_SI_001.PDF
21. Xu, D., Wang, Y., Xiong, B., & Li, T. (2017). MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, *12* (4), 557–566. https://doi.org/10.1007/S11465-017-0441-2/METRICS
22. Herrera-May, A. L., Aguilera-Cortés, L. A., García-Ramírez, P. J., & Manjarrez, E. (2009). Resonant Magnetic Field Sensors Based On MEMS Technology. *Sensors 2009, Vol. 9, Pages 7785-7813*, *9* (10), 7785–7813. https://doi.org/10.3390/S91007785
23. Su, J., Niekiel, F., Fichtner, S., Thormaehlen, L., Kirchhof, C., Meyners, D., Quandt, E., Wagner, B., & Lofink, F. (2020). AlScN-based MEMS magnetoelectric sensor. *Applied Physics Letters*, *117* (13). https://doi.org/10.1063/5.0022636/567189
24. Pachkawade, V., & Pachkawade, V. (2020). Ultra-Precise MEMS Based Bio-Sensors. *Biosensors - Current and Novel Strategies for Biosensing*. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.93931
25. Liu, H. F., Luo, Z. C., Hu, Z. K., Yang, S. Q., Tu, L. C., Zhou, Z. B., & Kraft, M. (2022). A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications. *Petroleum Science*, *19* (6), 2631–2648. https://doi.org/10.1016/J.PETSCI.2022.06.005
26. Wei, T., Zhou, M., Gu, L., Zhou, Y., & Li, M. (2022). How Shockwaves Open Tight Junctions of Blood-Brain Barrier: Comparison of Three Biomechanical Effects. *Journal of Physical Chemistry B*, *126* (27), 5094–5102. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCB.2C02903/SUPPL_FILE/JP2C02903_SI_004.MP4
27. Kabu, S., Jaffer, H., Petro, M., Dudzinski, D., Stewart, D., Courtney, A., Courtney, M., & Labhasetwar, V. (2015). Blast-Associated Shock Waves Result in Increased Brain Vascular Leakage and Elevated ROS Levels in a Rat Model of Traumatic Brain Injury. *PLOS ONE*, *10* (5), e0127971. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0127971
28. Nakagawa, A., Manley, G. T., Gean, A. D., Ohtani, K., Armonda, R., Tsukamoto, A., Yamamoto, H., Takayama, K., & Tominaga, T. (2011). Mechanisms of Primary Blast-

Induced Traumatic Brain Injury: Insights from Shock-Wave Research. *Https://Home.Liebertpub.Com/Neu*, *28* (6), 1101–1119. https://doi.org/10.1089/NEU.2010.1442
29. Brode, H. L. (1959). Blast Wave from a Spherical Charge. *The Physics of Fluids*, *2* (2), 217–229. https://doi.org/10.1063/1.1705911
30. Almustafa, M. K., & Nehdi, M. L. (2023). Fundamental review on collision of blast waves. *Physics of Fluids*, *35* (3). https://doi.org/10.1063/5.0138156/2881628
31. Ravin, R., Blank, P. S., Busse, B., Ravin, N., Vira, S., Bezrukov, L., Waters, H., Guerrero-Cazares, H., Quinones-Hinojosa, A., Lee, P. R., Fields, R. D., Bezrukov, S. M., & Zimmerberg, J. (2016). Blast shockwaves propagate Ca2+ activity via purinergic astrocyte networks in human central nervous system cells. *Scientific Reports 2016 6:1*, *6* (1), 1–14. https://doi.org/10.1038/srep25713
32. Yu M. et al., *Monolithically Integrated Triaxial High-Performance High-g MEMS Accelerometer*, Microsystems & Nanoengineering, 2025.
33. Sawyer, T. W., Wang, Y., Ritzel, D. v., Josey, T., Villanueva, M., Shei, Y., Nelson, P., Hennes, G., Weiss, T., Vair, C., Fan, C., & Barnes, J. (2016). High-Fidelity Simulation of Primary Blast: Direct Effects on the Head. *Journal of Neurotrauma*, *33* (13), 1181–1193. https://doi.org/10.1089/NEU.2015.3914
34. Baalman, K. L., Cotton, R. J., Rasband, S. N., & Rasband, M. N. (2013). Blast wave exposure impairs memory and decreases axon initial segment length. *Journal of Neurotrauma*, *30* (9), 741–751. https://doi.org/10.1089/NEU.2012.2478
35. Anas, S. M., Alam, M., & Umair, M. (2022). Air-blast and ground shockwave parameters, shallow underground blasting, on the ground and buried shallow underground blast-resistant shelters: A review. *International Journal of Protective Structures*, *13* (1), 99–139. https://doi.org/10.1177/20414196211048910;
36. Pyka, D., Kurzawa, A., Żochowski, P., Bajkowski, M., Magier, M., Grygoruk, R., Roszak, M., Jamroziak, K., & Bocian, M. (2025). Experimental and numerical research on additional vehicles protection against explosives. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* , *25* (2), 1–20. https://doi.org/10.1007/S43452-025-01121-W/FIGURES/8
37. Baranowski, P., Małachowski, J., & Mazurkiewicz, Ł. (2020). Local blast wave interaction with tire structure. *Defence Technology*, *16* (3), 520–529. https://doi.org/10.1016/J.DT.2019.07.021
38. Kciuk, S., Krzystała, E., Mężyk, A., & Szmidt, P. (2021). The Application of Microelectromechanical Systems (MEMS) Accelerometers to the Assessment of Blast Threat to Armored Vehicle Crew. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 316*, *22* (1), 316. https://doi.org/10.3390/S22010316
39. *Explosion and Blast-Related Injuries: Effects of Explosion and Blast from ... - Nabil M. Elsayed Ph.D., James L. Atkins MD Ph.D. - Google Books*. (n.d.). Retrieved September 7, 2025, from https://books.google.pl/books?hl=en&lr=&id=rhZHbqRfA0QC&oi=fnd&pg=PP1&ots=lLzXB2bMf6&sig=K3FMgz-CiqU601v93TRVuSYVz2E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
40. Dima, D. S., & Covaciu, D. (2017). Solutions for acceleration measurement in vehicle crash tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *252* (1), 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012007
41. Olvey, S. E., Knox, T., Cohn, K. A., Bailes, J. E., Liu, C. Y., & Cantu, R. C. (2004). The Development of a Method to Measure Head Acceleration and Motion in High-Impact Crashes. *Neurosurgery*, *54* (3), 672–677. https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000108782.68099.29

42. Wrazidło, D., Sławski, S., Krzystała, E., & Jarosz, T. (2025). Numerical Analysis of Shock Wave Impact on a Gas Cylinder. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *1146 LNNS*, 196–207. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73161-7_18
43. Arkusz, K., Klekiel, T., Sławiński, G., & Będziński, R. (2019). Influence of energy absorbers on Malgaigne fracture mechanism in lumbar-pelvic system under vertical impact load. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, *22* (3), 313–323. https://doi.org/10.1080/10255842.2018.1553238
44. Erdik, A., Kilic, S. A., Kilic, N., & Bedir, S. (2016). Erratum to: Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts (Shock Waves, 10.1007/s00193-015-0576-1). *Shock Waves*, *26* (4), 531. https://doi.org/10.1007/S00193-016-0678-4/FIGURES/1
45. Covaciu, D., & Dima, D. S. (2017). Crash Tests Data Acquisition and Processing. *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering*, 782–789. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_85
46. Sethuramalingam, T. K., & Vimalajuliet, A. (2010). Design of MEMS based capacitive accelerometer. *ICMET 2010 - 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings*, 565–568. https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598424
47. Kciuk S., Szymczyk M., Awrejcewicz J., *The Application of Microelectromechanical Systems (MEMS) Accelerometers and Autonomous Measurement System (ARMS) for Monitoring Blast Loads*, Sensors, 2021.
48. Ragam P., Nimaje D.S., *Application of MEMS-Based Accelerometer Wireless Sensor Systems for Monitoring of Blast-Induced Ground Vibration and Structural Health: A Review*, IET Wireless Sensor Systems, 2019.
49. Lin J.F. et al., *Study of Building Safety Monitoring by Using Cost-Effective MEMS Accelerometers*, Sensors, 2021.
50. Peng T. et al., *Reliability of MEMS in Shock Environments: 2000–2020*, Micromachines, 2021.
51. Kciuk S. et al., *Autonomous Measurement Systems for Blast Load Monitoring of Military Vehicles*, Sensors, 2021.
52. Ragam P., Nimaje D.S., *Monitoring of Blast-Induced Ground Vibration Using WSN and MEMS Sensors*, Journal of Vibroengineering, 2018.
53. Kciuk, M., Kowalik, Z., lo Sciuto, G., Sławski, S., & Mastrostefano, S. (2023). Intelligent Medical Velostat Pressure Sensor Mat Based on Artificial Neural Network and Arduino Embedded System. *Applied System Innovation*, *6* (5), 84. https://doi.org/10.3390/ASI6050084/S1
54. Tariq, S., Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2022). Data-driven application of MEMS-based accelerometers for leak detection in water distribution networks. *Science of The Total Environment*, *809*, 151110. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151110
55. Furubayashi, Y., Oshima, T., Yamawaki, T., Watanabe, K., Mori, K., Mori, N., Matsumoto, A., Kamada, Y., Isobe, A., & Sekiguchi, T. (2020). A 22-ng/√ Hz 17-mW Capacitive MEMS Accelerometer with Electrically Separated Mass Structure and Digital Noise- Reduction Techniques. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, *55* (9), 2539–2552. https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.2991533
56. Nie, Y., Huang, K., Yang, J., Cao, L., Cheng, L., Wang, Q., Tian, H., Peihua, W., & Heng, L. (2020). A Proposal to Enhance High-Frequency Optical MEMS Accelerometer Sensitivity Based on a One-Dimensional Photonic Crystal Wavelength Modulation System. *IEEE Sensors Journal*, *20* (24), 14639–14645. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3006220

57. Jones, D. L. (1968). Intermediate Strength Blast Wave. *The Physics of Fluids*, *11* (8), 1664–1667. https://doi.org/10.1063/1.1692177
58. Figuli, L., Cekerevac, D., Bedon, C., & Leitner, B. (2020). Numerical Analysis of the Blast Wave Propagation due to Various Explosive Charges. *Advances in Civil Engineering*, *2020* (1), 8871412. https://doi.org/10.1155/2020/8871412
59. Blandford, R. D., & McKee, C. F. (1976). Fluid dynamics of relativistic blast waves. *The Physics of Fluids*, *19* (8), 1130–1138. https://doi.org/10.1063/1.861619
60. Ridoux, J., Lardjane, N., Monasse, L., & Coulouvrat, F. (2020). Extension of geometrical shock dynamics for blast wave propagation. *Shock Waves*, *30* (6), 563–583. https://doi.org/10.1007/S00193-020-00954-Z/METRICS
61. Foust, H. C. (2021). Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion. *Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion*, 1–402. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87387-5/COVER
62. *Validation of a Simulation Process for Assessing the Response of a Vehicle and Its Occupants to an Explosive Threat*. (n.d.). Retrieved September 7, 2025, from https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA532543
63. Brand, O., Dufour, I., Heinrich, S. M., & Josse, F. (Eds.). (2015). Resonant MEMS: Principles, Modeling, Implementation, and Applications | Oliver Brand, Isabelle Dufour, Stephen Heinrich, Fabien Josse, Jan G. Korvink, Osamu Tabata | download. 512. https://books.google.com/books/about/Resonant_MEMS.html?hl=pl&id=8Fl_BwAAQBAJ
64. Shi, Y., Wang, N., Cui, J., Li, C., & Zhang, X. (2022). Experimental and numerical investigation of charge shape effect on blast load induced by near-field explosions. Process Safety and Environmental Protection, 165 (11), 266–277. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.018
65. Shock Measurement – ScienceDirect Topics https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/shock-measurement
66. PCB Piezotronics – Explosive, Gunfire and Impact Testing https://www.pcbpiezotronics.fr/wp-content/uploads/2016/05/Explosive-gun-impact-testing.pdf
67. Pyroshock – overview and accelerometer technologies https://en.wikipedia.org/wiki/Pyroshock
68. Accelerometer – sensor technologies and MEMS accelerometers https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer
69. MEMS Shock Accelerometers – PCB Whitepaper https://www.pcb.com/contentstore/mktgcontent/whitepapers/WPL_85_MEMSShockImpedance.pdf
70. Benevicius, V., Ostasevicius, V., & Gaidys, R. (2013). Identification of Capacitive MEMS Accelerometer Structure Parameters for Human Body Dynamics Measurements. Sensors 2013, Vol. 13, Pages 11184-11195, 13 (9), 11184–11195. https://doi.org/10.3390/S130911184
71. Ragam, P., & Sahebraoji, N. D. (2019). Application of MEMS-based accelerometer wireless sensor systems for monitoring of blast-induced ground vibration and structural health: A review. IET Wireless Sensor Systems, 9 (3), 103–109. https://doi.org/10.1049/IET-WSS.2018.5099;
72. D'Alessandro, A., Scudero, S., & Vitale, G. (2019). A Review of the Capacitive MEMS for Seismology. Sensors 2019, Vol. 19, Page 3093, 19 (14), 3093. https://doi.org/10.3390/S19143093

73. Di Nuzzo, F., Brunelli, D., Polonelli, T., & Benini, L. (2021). Structural Health Monitoring system with Narrowband IoT and MEMS sensors. IEEE Sensors Journal, 21(14), 16371–16380. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3075093
74. Wang, J., Liu, X., Liu, F., Chen, C., & Tang, Y. (2023). The Great Wall Vibration Monitoring of Traffic and Natural Hazards Using MEMS Accelerometers. Sensors 2023, Vol. 23, Page 2179, 23 (4), 2179. https://doi.org/10.3390/S23042179
75. Jia, C., Zhao, L., Jiang, W., Liu, X., Yu, M., Huang, M., Xia, Y., Zhao, Y., & Zhao, Y. (n.d.). IMPACT EXPERIMENT ANALYSIS OF MEMS ULTRA-HIGH G PIEZORESISTIVE SHOCK ACCELEROMETER.
76. Ragam, P., Nimaje, D. S., Ragam, P., & Nimaje, D. S. (2018). Monitoring of blast-induced ground vibration using WSN and prediction with an ANN approach of ACC dungri limestone mine, India. Journal of Vibroengineering, 20 (2), 1051–1062. https://doi.org/10.21595/JVE.2017.18647
77. Aruna, M., Vardhan, H., Tripathi, A. K., Parida, S., Raja Sekhar Reddy, N. v., Sivalingam, K. M., Yingqiu, L., & Elumalai, P. v. (2025). Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning. Scientific Reports 2025 15:1, 15 (1), 3999-. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86827-w
78. Blast Monitoring Systems & Strategies https://www.softdb.com/blog/blast-monitoring/
79. Staszewski, W., & Jabłonski, A. (2025). ANALYSIS OF IMPACT OF MEMS ACCELEROMETER POSITIONING ON VIBRATION SENSOR PERFORMANCE. Metrology and Measurement Systems, 32 (3). https://doi.org/10.24425/MMS.2025.155798
80. Younis, M. I. (2011). MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics. 20. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6020-7
81. Kannan, A. (2008). Design and modeling of a MEMS-based accelerometer with pull in analysis. https://doi.org/10.14288/1.0065590
82. Kaya T. et al., Design of a MEMS Capacitive Comb-drive Accelerometer. Retrieved June 22, 2026, from https://www.comsol.com/paper/design-of-a-mems-capacitive-comb-drive-accelerometer-11589
83. Rai, N., Suresh, H., & Sandeep Nagaraja, V. (2021). Design, Modelling, and Simulation analysis of a Single Axis MEMS-based Capacitive Accelerometer. International Journal of Engineering Trends and Technology, 69, 82–88. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I10P211
84. Lutiani-Silva, L., Rodrigues, J. R., Passaro, A., & Almeida, V. R. (2019). MEMS capacitive accelerometer: dynamic sensitivity analysis based on analytical squeeze film damping and mechanical thermoelasticity approaches. SN Applied Sciences, 1 (4). https://doi.org/10.1007/S42452-019-0327-5
85. Dürr, O., Fan, P.-Y., & Yin, Z.-X. (2023). Bayesian Calibration of MEMS Accelerometers. IEEE Sensors Journal, 23 (12), 13319–13326. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3272907
86. Ragam, P., & Nimaje, D. S. (2018). Selection and evolution of MEMS accelerometer sensor for measurement of blast-induced peak particle velocity. IEEE Sensors Letters, 2 (4). https://doi.org/10.1109/LSENS.2018.2872624
87. D'Alessandro, A., Scudero, S., & Vitale, G. (2019). A Review of the Capacitive MEMS for Seismology. Sensors 2019, Vol. 19, Page 3093, 19 (14), 3093. https://doi.org/10.3390/S19143093
88. Jia, C., Zhao, L., Jiang, W., Liu, X., Yu, M., Huang, M., Xia, Y., Zhao, Y., & Zhao, Y. (2018). Impact experiment analysis of MEMS ultra-high G piezoresistive shock accelerometer. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018-January, 964–967. https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2018.8346718

89. Li, C., Zhang, R., Hao, L., & Zhao, Y. (2024). Development of a MEMS Piezoresistive High-g Accelerometer with a Cross-Center Block Structure and Reliable Electrode. Sensors 2024, Vol. 24, Page 5540, 24 (17), 5540. https://doi.org/10.3390/S24175540
90. Yu, M., Wu, X., Zhao, L., Jia, C., Xia, Y., Han, X., Wang, T., & Luo, G. (2025). Monolithically integrated triaxial high-performance high-g accelerometer for high shock vibration signal measurements. Microsystems & Nanoengineering 2025 11:1, 11 (1), 206-. https://doi.org/10.1038/s41378-025-01051-w
91. Liu, F., Gao, S., Niu, S., Zhang, Y., Guan, Y., Gao, C., & Li, P. (2017). Optimal design of high-g MEMS piezoresistive accelerometer based on Timoshenko beam theory. Microsystem Technologies 2017 24:2, 24 (2), 855–867. https://doi.org/10.1007/S00542-017-3585-4
92. Peng, T., & You, Z. (2021). Reliability of MEMS in Shock Environments: 2000–2020. Micromachines 2021, Vol. 12, Page 1275, 12 (11), 1275. https://doi.org/10.3390/MI12111275
93. Zhang, Z., Shi, Z., Yang, Z., Xie, Z., Zhang, D., Cai, D., Li, K., & Shen, Y. (2015). Design, Simulation and Fabrication of Triaxial MEMS High Shock Accelerometer. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 15 (4), 2952–2957. https://doi.org/10.1166/JNN.2015.9645
94. Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. (1998). Micromachined inertial sensors. Proceedings of the IEEE, 86(8), 1640–1658. https://doi.org/10.1109/5.704269
95. Younis, M. I. (2011). *Elements of Lumped-Parameter Modeling in MEMS*. 97–153. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6020-7_4.
96. Wang, C., Wu, X., Sadeghpour, S., Shojaeian, M., Wang, L., Madeira, B. P., Guan, Y., Liu, H., Wang, Y., Zhang, P., & Mak, P. I. (2025). A MEMS electro-mechanical co-optimization platform featuring freeform geometry optimization based on a genetic algorithm. *Microsystems & Nanoengineering 2025 11:1*, *11*(1), 64-. https://doi.org/10.1038/s41378-025-00910-w
97. Zhao C., *Automated synthesis of mixed-technology MEMS systems with electronic control*. (Retrieved August, 2026, from https://www.researchgate.net/publication/277785744_Automated_synthesis_of_mixed-technology_MEMS_systems_with_electronic_control)
98. Harris C.M., Piersol A.G., Harris' Shock and Vibration Handbook | McGraw-Hill Education - Access Engineering, Retrieved August, 2026
99. Ewins, D. J. (2001). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 562. https://books.google.com/books/about/Modal_Testing.html?hl=pl&id=09_zDwAAQBAJ
100. Maia, N. M. Mendes., & Montalvao e Silva, J. M. (1998). *Theoretical and experimental modal analysis*. 468. https://www.wiley.com/en-gb/theoretical-and-experimental-modal-analysis-p-9780863802089

Streszczenie rozprawy w języku polskim

Przedmiotem rozprawy było zastosowanie mikroelektromechanicznych układów sensorycznych MEMS do rejestracji i analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wybuchu. Celem pracy było opracowanie i weryfikacja systemu pomiarowego umożliwiającego rejestrację szybkozmiennych sygnałów dynamicznych oraz określenie wpływu właściwości dynamicznych zastosowanego akcelerometru MEMS na uzyskiwane wyniki pomiarowe.

W ramach pracy opracowano autorski system akwizycji danych współpracujący z akcelerometrem MEMS, umożliwiający rejestrację sygnałów z częstotliwością próbkowania 100 kHz. Przeprowadzono badania laboratoryjne i terenowe, których wyniki potwierdziły możliwość rejestracji krótkotrwałych impulsów przyspieszenia generowanych podczas oddziaływania fali uderzeniowej oraz wykorzystania uzyskanych sygnałów do analizy odpowiedzi dynamicznej badanych struktur.

Istotnym elementem badań było opracowanie modelu numerycznego oddziaływania obciążenia impulsowego w środowisku LS-DYNA. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem modeli opisujących falę uderzeniową, w tym modelu Friedlandera oraz metody CONWEP. Porównanie wyników obliczeń z rezultatami badań eksperymentalnych wykazało dobrą zgodność, potwierdzając poprawność przyjętych założeń modelowych.

W pracy przeprowadzono również szczegółową identyfikację rzeczywistej struktury badanego akcelerometru MEMS. Zastosowanie tomografii komputerowej, interferometrii optycznej, mikroskopii elektronowej SEM, analizy EDS oraz pomiarów wibrometrycznych pozwoliło na określenie jego parametrów geometrycznych, materiałowych i dynamicznych. Na ich podstawie opracowano model mechaniczny, elektryczny i elektromechaniczny sensora, a następnie zweryfikowano go eksperymentalnie. Uzyskana zgodność wyników modelowania z pomiarami potwierdziła jego przydatność do opisu odpowiedzi czujnika na wymuszenia impulsowe.

Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości dynamiczne akcelerometru MEMS mają istotny wpływ na kształt i interpretację rejestrowanych sygnałów. Oznacza to, że wykorzystanie tego typu czujników do analizy obciążeń impulsowych wymaga uwzględnienia ich charakterystyk dynamicznych oraz wpływu sensora na uzyskiwaną odpowiedź pomiarową.

Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania akcelerometrów MEMS do rejestracji i analizy odpowiedzi dynamicznej struktur mechanicznych poddanych oddziaływaniu fali uderzeniowej wybuchu, pod warunkiem uwzględnienia właściwości dynamicznych sensora opisanych zweryfikowanym modelem elektromechanicznym. Opracowane rozwiązania mogą stanowić podstawę do dalszego rozwoju kompaktowych systemów pomiarowych przeznaczonych do diagnostyki konstrukcji poddawanych obciążeniom impulsowym.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim

The subject of the thesis was the application of microelectromechanical systems (MEMS) for the recording and analysis of the dynamic response of mechanical structures subjected to the impact of an explosion shock wave. The aim of the work was to develop and verify a measurement system capable of recording rapidly changing dynamic signals, and to determine the influence of the dynamic properties of the MEMS accelerometer used on the measurement results obtained.

As part of the study, a proprietary data acquisition system was developed to work in conjunction with the MEMS accelerometer, enabling the recording of signals at a sampling rate of 100 kHz. Laboratory and field tests were carried out, the results of which confirmed the possibility of recording short-duration acceleration pulses generated during shock wave impact and the use of the obtained signals to analyse the dynamic response of the structures under investigation.

A key element of the research was the development of a numerical model of impulse loading within the LS-DYNA environment. Analyses were carried out using models describing the shock wave, including the Friedlander model and the CONWEP method. A comparison of the calculation results with the experimental findings showed good agreement, confirming the validity of the modelling assumptions.

The study also involved a detailed characterisation of the actual structure of the MEMS accelerometer under investigation. The use of computed tomography, optical interferometry, SEM electron microscopy, EDS analysis and vibrometric measurements enabled the determination of its geometric, material and dynamic parameters. On this basis, mechanical, electrical and electromechanical models of the sensor were developed and subsequently verified experimentally. The agreement between the modelling results and the measurements confirmed the model's suitability for describing the sensor's response to impulse excitations.

The research carried out demonstrated that the dynamic properties of the MEMS accelerometer have a significant influence on the shape and interpretation of the recorded signals. This means that the use of this type of sensor for the analysis of impulse loads requires consideration of their dynamic characteristics and the influence of the sensor on the resulting measurement response.

The results obtained confirmed the feasibility of using MEMS accelerometers to record and analyse the dynamic response of mechanical structures subjected to an explosion shock wave, provided that the sensor's dynamic properties, as described by a verified electromechanical model, are taken into account. The solutions developed may form the basis for the further development of compact measurement systems designed for the diagnostics of structures subjected to impulse loads.