

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego
SZKOŁA DOKTORSKA



ROZPRAWA DOKTORSKA

kpt. mgr inż. Dawid Dariusz GOŹDZIK

(stopień, imiona i nazwisko doktoranta)

**BADANIA DOŚWIADCZALNE UKŁADU AUTOMATYKI BRONI
DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE ODRZUTU ZAMKA
PÓLSWOBODNEGO OPÓŹNIANEGO GAZODYNAMICZNIE**

(tytuł rozprawy doktorskiej)

nauki inżynieryjno-techniczne, inżynieria mechaniczna

(dziedzina nauki, dyscyplina naukowa)

dr hab. inż. Ryszard WOŹNIAK, prof. WAT

(stopień wojskowy, tytuł/stopień naukowy, imię i nazwisko promotora)

płk dr inż. Mirosław ZAHOR

(stopień wojskowy, tytuł/stopień naukowy, imię i nazwisko promotora pomocniczego)

Warszawa – 2025 r.

Strona celowo zostawiona pusta

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	7
WYKAZ SKRÓTÓW	11
WSTĘP	13
ROZDZIAŁ I	
ANALIZA STANU WIEDZY W DZIEDZINIE METOD BADANIA AUTOMATYCZNEJ BRONI PALNEJ I AMUNICJI STRZELECKIEJ.....	19
1.1. Analiza literatury w zakresie badań automatycznej broni palnej i stanowisk laboratoryjnych do jej badania	20
1.1.1. Stanowiska laboratoryjne zawierające badaną broń, w której nie wprowadzono żadnych modyfikacji	21
1.1.2. Stanowiska laboratoryjne zawierające badaną broń, w której wprowadzono modyfikacje (nietrwale).....	24
1.1.3. Stanowiska laboratoryjne zawierające broń, która jest trwale zmodyfikowana	26
1.1.4. Specjalistyczne stanowiska laboratoryjne	27
1.2. Analiza literatury w zakresie badań amunicji strzeleckiej	29
1.2.1. Pomiar ciśnienia w przewodzie lufy	29
1.2.2. Określanie prędkości pocisku na torze lotu	34
1.3. Analiza literatury w zakresie planowania eksperymentu (DOE).....	36
1.4. Podsumowanie rozdziału I.....	42
ROZDZIAŁ II	
BADANIA AMUNICJI PISTOLETOWEJ ORAZ BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE ODRZUTU ZAMKA PÓLSWOBODNEGO OPÓŹNIANEGO GAZODYNAMICZNIE	43
2.1. Badania charakterystyk balistycznych amunicji pistoletowej	43
2.2. Badania charakterystyk dynamicznych broni działającej na zasadzie OZPOG	47
2.3. Podsumowanie rozdziału II.....	53
ROZDZIAŁ III	
MODYFIKACJA UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE ODRZUTU ZAMKA PÓLSWOBODNEGO OPÓŹNIANEGO GAZODYNAMICZNIE	55
ROZDZIAŁ IV	
CHARAKTERYSTYKA I TESTOWANIE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO DOŚWIADCZALNEGO BADANIA UKŁADU AUTOMATYKI BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE OZPOG.....	59
4.1. Charakterystyka części mechanicznej stanowiska laboratoryjnego	59
4.1.1. Zespół nasady z lufą i komorą gazową	60
4.1.2. Zespół suwadła z zamkiem	63
4.1.3. Zespół mechanizmu spustowego	65

4.1.4. Zespół urządzenia powrotnego.....	66
4.1.5. Zespół mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia	66
4.1.6. Zespół podstawy.....	67
4.1.7. Wykonanie i montaż stanowiska laboratoryjnego	68
4.2. Charakterystyka części pomiarowej stanowiska laboratoryjnego	69
4.3. Opis funkcjonalności stanowiska laboratoryjnego	72
4.4. Opis testowania stanowiska laboratoryjnego	73
4.5. Podsumowanie rozdziału IV	76
ROZDZIAŁ V	
BADANIA DOCELOWEJ AMUNICJI PISTOLETOWEJ WYKORZYSTANEJ DO BADAŃ UKŁADU AUTOMATYKI BRONI Z OZPOG	
5.1. Badania masowe amunicji	80
5.2. Badania charakterystyk balistycznych amunicji	81
5.3. Badania siły rozcalania amunicji i powtarzalności elaboracji	84
5.4. Podsumowanie rozdziału V	89
ROZDZIAŁ VI	
ZASADNICZE BADANIA AUTOMATYKI BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE OZPOG NA STANOWISKU LABORATORYJNYM	
6.1. Badania prędkości zespołu odrzucanego	93
6.1.1. Analiza statystyczna wyników badań prędkości zespołu odrzucanego	97
6.1.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności	100
6.1.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu	105
6.2. Badania ciśnienia w komorze gazowej	109
6.2.1. Analiza statystyczna wyników badań ciśnienia w komorze gazowej...	111
6.2.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności	114
6.2.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu	116
6.3. Badania prędkości pocisku na torze lotu	117
6.3.1. Analiza statystyczna wyników badań prędkości pocisku na torze lotu	118
6.3.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności	121
6.3.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu	122
6.4. Podsumowanie rozdziału VI	124
ROZDZIAŁ VII	
BADANIA WPŁYWU ŁADUNKU MIOTAJĄCEGO NABOJU PISTOLETOWEGO NA DZIAŁANIE UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO.....	
7.1. Wyniki badań	127
7.2. Analiza statystyczna wyników badań.....	129

7.3. Podsumowanie rozdziału VII	132
ROZDZIAŁ VIII	
BADANIA WPŁYWU GEOMETRII OTWORU GAZOWEGO NA DZIAŁANIE	
UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO	135
8.1. Wyniki badań	135
8.1.1. Wpływ geometrii otworu gazowego na prędkość zespołu odrzucanego	137
8.1.2. Wpływ geometrii otworu gazowego na ciśnienie w komorze gazowej	139
8.2. Podsumowanie rozdziału VIII	142
PODSUMOWANIE	145
BIBLIOGRAFIA	153
ZAŁĄCZNIKI	
Załącznik nr 1 – Podstawowe parametry aparatury wykorzystanej w badaniach	
Załącznik nr 2 – „Program badań eksperymentalnych pracy układu z zamkiem półswobodnym opóźnianym gazodynamicznie”	

Strona celowo zostawiona pusta

WYKAZ OZNACZEŃ

b_0, b_1, \dots	– współczynniki funkcji aproksymującej funkcję obiektu
e	– błąd graniczny wartości średniej
e_1	– błąd graniczny pomiaru
f	– częstość dla stopnia swobody wynoszącego $r-1$
f_a	– częstość
f_A	– funkcja aproksymująca funkcję obiektu
F	– zmienna losowa w teście Fishera-Snedecora
F_{kr}	– wartość krytyczna zmiennej losowej w teście Fishera-Snedecora
F_{pd}	– siła oddziaływania stanowiska laboratoryjnego na podstawie
F_r	– siła rozcalania pocisku z łuską
F_{rmax}	– maksymalna wartość siły rozcalania pocisku z łuską
I	– kontrast w planach doświadczenia
I_{min}	– funkcja w metodzie najmniejszych kwadratów
k	– numer parametru wejściowego w planowaniu doświadczenia
Kx	– oznaczenie konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla planu doświadczenia przeznaczanego do realizacji Metodyki nr 2 „Programu Badań”, gdzie „x” oznacza numer konfiguracji
m_{zo}	– masa zespołu odrzucanego
M	– błąd średniokwadratowy aproksymacji
M3-x	– oznaczenie konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla planu doświadczenia przeznaczanego do realizacji Metodyki nr 3 „Programu Badań”, gdzie „x” oznacza numer konfiguracji
M4-x	– oznaczenie konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla planu doświadczenia przeznaczanego do realizacji Metodyki nr 4 „Programu Badań”, gdzie „x” oznacza numer konfiguracji
M4-z-x	– oznaczenie konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla planu doświadczenia przeznaczanego do realizacji Metodyki nr 4 „Programu Badań”, gdzie: „z” numer czujnika ciśnienia, „x” oznacza numer konfiguracji
M_{ij}	– wartość macierzy M w danym wierszu i kolumnie
n	– liczba konfiguracji układu
N	– liczba parametrów wejściowych
N_b	– liczba współczynników funkcji obiektu (bez wyrazu wolnego b_0)
p	– ciśnienie
p_{kg}	– ciśnienie w komorze gazowej

ρ_{kgmax}	– maksymalne ciśnienie w komorze gazowej
ρ_{max}	– ciśnienie maksymalne
r	– liczba powtórzeń pomiarów
R	– współczynnik korelacji wielokrotnej
S	– odchylenie standardowe próbki
S^2	– wariancja niedokładności pomiarów
S_b	– odchylenie standardowe współczynników wyrazów liniowych funkcji aproksymującej funkcję obiektu
t	– czas
t_α	– wartość zmiennej t_s dla danego poziomu ufności
$t_{\alpha,f}$	– wartość krytyczna zmiennej w rozkładzie t-Studenta
t_s	– parametr (zmienna) obliczany w statystyce pomiarów
t_w	– chwila wylotu pocisku z lufy
T	– parametr w rozkładzie t-Studenta
T_{kr}	– wartość krytyczna w teście t-Studenta
V_{zo}	– prędkość ruchu postępowego zespołu odrzucanego
V_{zomax}	– maksymalna prędkość ruchu postępowego zespołu odrzucanego
V_0	– prędkość początkowa pocisku
V_2	– prędkość pocisku wyznaczana w odległości 2 m od wylotu lufy
V_{max}	– prędkość maksymalna pocisku
V_{rad}	– prędkość radialna pocisku
V_w	– prędkość wylotowa pocisku
X_k	– unormowana wartość k -tego parametru
x_k	– nieunormowana wartość k -tego parametru
x_{kmin}	– nieunormowana minimalna wartość k -tego parametru
x_{kmax}	– nieunormowana maksymalna wartość k -tego parametru
x_{zo}	– przemieszczenie zespołu odrzucanego
X_1	– unormowana wartość położenia otworu gazowego mierzonego od płasku wlotowego lufy
X_2	– unormowana wartość średnicy otworu gazowego
X_3	– unormowana wartość masy zespołu odrzucanego
X_4	– unormowana wartość średnicy tłoczyska
X_5	– unormowana wartość długości tłoczyska
x_1	– nieunormowana wartość położenia otworu gazowego mierzonego od płasku wlotowego lufy
x_2	– nieunormowana wartość średnicy otworu gazowego

X_3	– nieunormowana wartość masy zespołu odrzucanego
X_4	– nieunormowana wartość średnicy tłoczyska
X_5	– nieunormowana wartość długości tłoczyska
Z	– wartość uzyskana doświadczalnie (pojedyncza próbka)
\bar{z}	– średnia arytmetyczna
Z_i	– wartość funkcji aproksymowanej
$Z_{i\text{apros}}$	– wartość obliczona przy użyciu funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla danej konfiguracji układu
$Z_{i\text{eksp}}$	– średnia wartość z próbek (pomiarów) dla danej konfiguracji układu
α	– poziom istotności
α_d	– ramię gwiazdne planu doświadczenia
ΔZ_{max}	– maksymalny błąd bezwzględny aproksymacji

Strona celowo zostawiona pusta

WYKAZ SKRÓTÓW

AF	– Amunicja fabryczna
AR	– Amunicja reelaborowana (rozcalona i ponownie zaelaborowana)
CIP	– Międzynarodowa organizacja <i>The Commission internationale permanente pour l'épreuve des armes à feu portatives</i> (z ang. <i>Permanent International Commission for the Proof of Small Arms</i>)
COVID-19	– Coronavirus disease 2019
DoE	– Design of Experiments
EPVAT	– Electronic Pressure, Velocity and Action Time
HK	– Heckler & Koch
HPI	– High Pressure Instruments
ITU	– Instytut Techniki Uzbrojenia
MON	– Ministerstwo Obrony Narodowej
MSBS	– Modułowy System Broni Strzeleckiej
NATO	– North Atlantic Treaty Organization
OGP	– Odprowadzenie części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie
OL	– Odrzut lufy
OZ	– Odrzut zamka
OZPOG	– Odrzut zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie
OZP	– Odrzut zamka półswobodnego
OZS	– Odrzut zamka swobodnego
PARA	– Amunicja 9x19 mm Parabellum
POWA	– Parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej
RSM	– Response Surface Methodology
SAAMI	– Stowarzyszenie amerykańskich producentów broni palnej i amunicji, z ang. <i>Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute</i>
S&B	– Sellier&Bellot
UGB	– Uczelniany Grant Badawczy
WAT	– Wojskowa Akademia Techniczna
WML	– Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
ZAU	– Zakład Broni i Amunicji
ZO	– Zespół odrzucany
ZP	– Zamek półswobodny
ZS	– Zamek swobodny

Strona celowo zostawiona pusta

WSTĘP

W Instytucie Techniki Uzbrojenia (ITU) Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa (WML) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) od wielu lat prowadzone są – we współpracy z zakładami polskiego przemysłu zbrojeniowego – prace teoretyczne i doświadczalne, mające na celu doskonalenie procesów projektowania i badania automatycznej broni strzeleckiej. Wyniki tych prac znalazły już zastosowanie m.in. w najnowszej broni strzeleckiej produkowanej przez Fabrykę Broni „Łucznik”-Radom Sp. z o.o., wprowadzonej w ostatnich latach do uzbrojenia Sił Zbrojnych RP i służb mundurowych, tj. broni systemu MSBS (Modułowego Systemu Broni Strzeleckiej), np.: 5,56 mm karabinku reprezentacyjnym MSBS-5,56R, 5,56 mm karabinku standardowym (podstawowym) w układzie klasycznym MSBS GROT (C16 FB M1/2) i 7,62 mm samopowtarzalnym karabinie wyborowym MSBS-7,62N. Ponadto, 5,56 mm karabinek standardowy (podstawowy) w układzie bezkolbowym MSBS GROT (B16 FB M1) i 5,56 mm subkarabinek w układzie klasycznym MSBS GROT od 2025 r. są przygotowane do wdrożenia do wojsk.

Analiza światowych tendencji rozwojowych w dziedzinie uzbrojenia, w tym strzeleckiego, prowadzi do wniosków, że czołowe ośrodki projektowo-konstrukcyjne zajmujące się jego rozwojem wykorzystują w procesie opracowywania nowych produktów zaawansowane modele matematyczne. Przynosi to efekty w postaci zauważalnego skrócenia cyklu projektowania broni oraz obniżenia jego kosztów. Ma to niezwykle duże znaczenie praktyczne, gdyż wszystkie firmy dążą do minimalizowania czasu i kosztów „od pomysłu do wdrożenia”.

Podstawą do opracowania każdego wiarygodnego modelu matematycznego jest jego walidacja. Jednak, aby przeprowadzić proces walidacji kompleksowego modelu matematycznego, uwzględniającego najważniejsze parametry techniczne modelowanego układu, niezbędne jest uzyskanie wyników badań eksperymentalnych o odpowiedniej jakości (wiarygodności) i w pożądanym, szerokim zakresie zmian tych parametrów. Aby spełnić te wymagania często konieczne jest opracowanie i wykonanie specjalistycznych stanowisk laboratoryjnych, które gwarantowałyby uzyskanie ściśle określonych celów badań. W związku z występującą na rynku militarnym dużą konkurencją, funkcjonalne i zwalidowane modele matematyczne,

opisujące działanie mechanizmów automatycznej broni podczas strzału, nie są powszechnie dostępne i zwykle stanowią ściśle chronioną tajemnicę producentów.

Broń automatyczna z odrzutem zamka ma wiele zalet w stosunku do broni działającej na innych zasadach, dlatego jest nadal rozwijana przez czołowych producentów uzbrojenia oraz wykorzystywana przez wiele armii. Popularne są zwłaszcza działające na tej zasadzie pistolety i pistolety maszynowe. Niestety, w dostępnej literaturze przedmiotu nie dostrzeżono kompletnego modelu matematycznego działania automatycznej broni palnej działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie (OZPOG). Układ ten mógłby być zastosowany w broni zasilanej amunicją pośrednią i karabinową, która charakteryzuje się większym impulsem ciśnienia gazów prochowych niż amunicja pistoletowa. Opracowanie modelu matematycznego pracy automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG może mieć bardzo duże znaczenie praktyczne w procesie projektowania nowoczesnej broni strzeleckiej, zwłaszcza charakteryzującej się dużą intensywnością ognia.

Mając na uwadze powyższe, a także ze względu na interdyscyplinarny i złożony charakter badań, obszerny zakres prac do wykonania oraz zapewnienie odpowiednich warunków bezpieczeństwa podczas prowadzenia badań z wykorzystaniem broni, amunicji i materiałów wybuchowych, w 2020 r. – na wniosek promotora i promotora pomocniczego – autor niniejszej dysertacji i kpt. mgr inż. Mateusz MORAWSKI – podjęli zespołowe prace badawcze w Szkole Doktorskiej Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, mające na celu opracowanie modelu matematycznego pracy układu z OZPOG oraz zwalidowanie go, bazując na wynikach badań eksperymentalnych. Cel ten osiągnięto, przedkładając Szkole Doktorskiej WAT w marcu 2025 r., pozytywnie zaopiniowane przez promotora, zespołowe opracowanie autorstwa obu doktorantów pt. „Badania teoretyczne i doświadczalne broni działającej na zasadzie odrzutu zamka” [1]. W opracowaniu tym jednoznacznie wyodrębniono indywidualne osiągnięcia każdego z Doktorantów oraz wskazano przedsięwzięcia zrealizowane wspólnie. Jednakże, zgodnie z opinią Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej¹, dzieło [1] rozdzielono na dwie oddzielne rozprawy doktorskie pt.:

¹ Ad. 7 „Protokołu nr 06/2025 z posiedzenia Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” WAT w dniu 18.06.2025 r.

- „Opracowanie i walidacja modelu działania układu automatyki broni z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie” [2] – autor kpt. mgr. inż. Mateusz MORAWSKI.
- „Badania doświadczalne układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie” – autor kpt. mgr. inż. Dawid GOŹDZIK.

Głównym celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej pt. „Badania doświadczalne układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie” było przeprowadzenie badań doświadczalnych układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, których wyniki umożliwiłyby walidację modelu matematycznego pracy układu z OZPOG oraz poznanie odpowiedzi układu na zmianę jego wybranych parametrów konstrukcyjnych. Osiągnięcie tego celu może pozytywnie wpłynąć na rozwój w Polsce nowoczesnych metod eksperymentalnych oraz spowodować upowszechnienie stosowania nowych (dla dziedziny uzbrojenia) metod statystycznych w procesie planowania eksperymentu, co w efekcie może przełożyć się na wzrost konkurencyjności polskiego przemysłu zbrojeniowego w obszarze opracowywania innowacyjnych, nowych i perspektywicznych wzorów broni strzeleckiej o zaawansowanej konstrukcji i technologii.

Aby osiągnąć zamierzony cel pracy doktorskiej, opracowano metodykę rozwiązania problemu badawczego, której realizację podzielono na osiem spójnych etapów, tożsamy z rozdziałami pracy doktorskiej.

W **pierwszym etapie** przeprowadzono analizę stanu wiedzy w obszarach: badań automatycznej broni strzeleckiej, stanowisk laboratoryjnych do jej badania, badań amunicji strzeleckiej oraz planowania eksperymentu. Wnioski z tego etapu wykorzystano do wyboru adekwatnych metod i urządzeń, które zostały wykorzystane w dalszych etapach pracy, oraz wyboru metody badań eksperymentalnych.

W **drugim etapie** wykonano badania instrumentalne charakterystyk balistycznych amunicji pistoletowej, przeznaczonej do zasilania analizowanego układu konstrukcyjnego oraz przeprowadzono badania charakterystyk dynamicznych broni działającej na zasadzie OZPOG. Na podstawie tych badań pozyskano dane niezbędne

w procesie projektowania stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania układu automatyki działającej na zasadzie OZPOG.

W **etapie trzecim** opracowano modyfikację układu konstrukcyjnego broni działającej na zasadzie OZPOG. Modyfikacja ta znacznie zwiększyła uniwersalność tego układu, pod kątem jego zastosowania w różnych typach broni strzeleckiej.

W **czwartym etapie** zaprojektowano, wykonano, zmontowano i przetestowano stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania układu automatyki broni z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie. Opracowano także „Program badań eksperymentalnych pracy układu z zamkiem półswobodnym opóźnianym gazodynamicznie”², który zawiera m.in. cztery metodyki badawcze.

W **piątym etapie** wykonano badania eksperymentalne docelowej amunicji (stosowanej w badaniach na stanowisku laboratoryjnym), w zakresie charakterystyk balistycznych (ciśnienia w przewodzie lufy i prędkości pocisku na torze lotu) oraz jej siły rozczalenia i powtarzalności elaboracji.

W **szóstym etapie** przeprowadzono badania zasadnicze na zaprojektowanym i wykonanym w ramach etapu czwartego stanowisku laboratoryjnym oraz przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań.

Etap siódmy obejmował badania wpływu ładunku miotającego naboju pistoletowego na działanie układu opóźnienia gazowego, a **etap ósmy** – badania mające na celu określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie tego układu.

Problematyka, będąca przedmiotem pracy doktorskiej jest istotna i potrzebna, zwłaszcza obecnie, gdy Siły Zbrojne RP są intensywnie modernizowane, a formacje odpowiedzialne za bezpieczeństwo wewnętrzne państwa poszukują nowoczesnego uzbrojenia. Ponadto, problematyka ta wpisuje się w technologię priorytetową pn. „Technologia produkcji broni szybkostrzelnej o dużej intensywności ognia”, ujętą w obszarze pt. „Technologie materiałowe i wytwarzanie”, dokumentu pt. „Priorytetowe kierunki badań naukowych w resorcie obrony narodowej na lata 2021-2035” [3], opracowanego przez Departament Innowacji Ministerstwa Obrony Narodowej.

² W dalszej części rozprawy doktorskiej „Program badań eksperymentalnych pracy układu z zamkiem półswobodnym opóźnianym gazodynamicznie” będzie nazywany w skrócie „Program badań”.

Niniejszą rozprawę doktorską realizowano m.in. w ramach Uczelnianych Grantów Badawczych (UGB) Wojskowej Akademii Technicznej pt.:

- „Teoretyczne i doświadczalne badania broni działającej na zasadzie odrzutu – część I” – nr UGB 890/2021 (grant wykonywany w 2021 r.),
- „Teoretyczne i doświadczalne badania broni działającej na zasadzie odrzutu – część II” – nr UGB 772/2022 (grant wykonywany w 2022 r.),
- „Rozwijanie metod eksperymentalnych i narzędzi symulacyjnych do wspomagania projektowania uzbrojenia strzeleckiego, część I” – nr UGB 829/2023 (grant wykonywany w 2023 r.),
- „Rozwijanie metod eksperymentalnych i narzędzi symulacyjnych do wspomagania projektowania uzbrojenia strzeleckiego, część II” – nr UGB 743/2024 (grant wykonywany w 2024 r.).

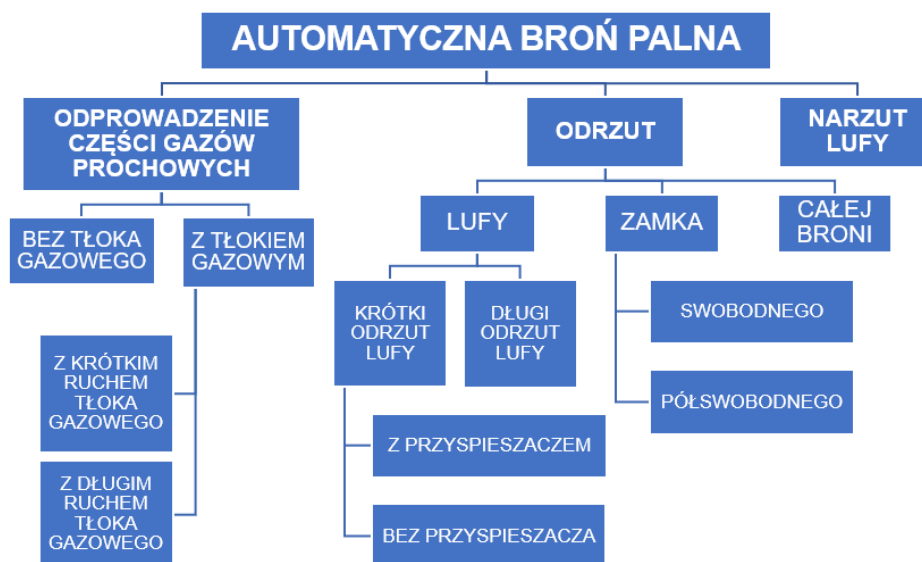
Strona celowo zostawiona pusta

ROZDZIAŁ I

ANALIZA STANU WIEDZY W DZIEDZINIE METOD BADANIA AUTOMATYCZNEJ BRONI PALNEJ I AMUNICJI STRZELECKIEJ

Zgodnie z definicją zawartą w [4], automatyczna broń palna to urządzenie miotające, które do miotania pocisków wykorzystuje energię kinetyczną gazów powstałych ze spalania ładunku miotającego (najczęściej prochowego). Kluczową cechą takiej broni jest to, że wszystkie czynności cyklu jej pracy (poza załadowaniem pierwszego naboju) – od przeładowania do oddania kolejnego strzału³ – są wykonywane za pomocą mechanizmów i nie wymagają ingerencji człowieka.

Automatyczną broń palną można sklasyfikować według różnych kryteriów, jednak na szczególną uwagę zasługuje sposób wykorzystania gazów prochowych do napędzania jej mechanizmów (rys. 1.1). Według tego kryterium wyróżnia się przede wszystkim konstrukcje bazujące na odprowadzeniu części gazów prochowych z przestrzeni zapociskowej, odrzutu oraz narzutu lufy [5]. Spośród szerokiej gamy dostępnych konstrukcji, największą popularność zdobyły systemy wykorzystujące: odprowadzenie części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie (OGP), odrzut lufy (OL) oraz odrzut zamka (OZ).



Rys. 1.1. Systematyka automatycznej broni palnej ze względu na zasadę działania (opracowano na podstawie [6])

³ W broni samopowtarzalnej (strzelającej ogniem pojedynczym), aby oddać kolejny strzał należy również zwolnić i ponownie nacisnąć język spustowy.

W pracach [2], [7] i [8] przeprowadzono szczegółową analizę stanu wiedzy w dziedzinie konstrukcji i modelowania pracy automatycznej broni palnej. Analiza skupiła się głównie na broni działającej na zasadzie odrzutu zamka swobodnego (OZS) oraz półswobodnego (OZP) z różnym sposobem opóźniania ruchu zamka. W [2] zawarto również podstawowe wyniki badań gabarytowo-masowych wybranych wzorów broni działającej na zasadzie OZP, ze szczególnym uwzględnieniem jednej z najbardziej udanych konstrukcji działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie (OZPOG) – 9 mm pistoletu HK P7 niemieckiej firmy H&K.

Na podstawie przeprowadzonej analizy oraz wniosków zawartych w [2], [7] i [8] zdecydowano, że przedmiotem dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych w ramach niniejszej rozprawy będzie mechanizm zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, który jest najbardziej perspektywiczny i podatny na dalsze modyfikacje. Co więcej, analiza stanu techniki oraz wyniki badań gabarytowo-masowych broni działającej na zasadzie OZS i OZP dostarczyła danych niezbędnych do zaprojektowania i wykonania stanowiska laboratoryjnego, umożliwiającego przeprowadzenie badań doświadczalnych pracy układu z OZPOG.

1.1. Analiza literatury w zakresie badań automatycznej broni palnej i stanowisk laboratoryjnych do jej badania

Badania automatycznej broni palnej i zjawisk fizycznych związanych z jej pracą są prowadzone głównie przez producentów broni, często we współpracy z jednostkami naukowo-badawczymi. Metody badań, opracowane stanowiska laboratoryjne do ich prowadzenia oraz wyniki badań nie są zazwyczaj podawane do publicznej wiadomości (bądź są upubliczniane fragmentarycznie, albo publikowane z bardzo dużym opóźnieniem), często stanowiąc tajemnicę przedsiębiorstwa lub informację niejawną. W związku z tym, ogólnodostępna wiedza na ten temat jest mocno ograniczona.

Badania automatycznej broni palnej można prowadzić, wykorzystując głównie cztery grupy stanowisk laboratoryjnych. Pierwsza grupa obejmuje stanowiska laboratoryjne zawierające badaną broń, w której nie wprowadzono żadnych modyfikacji. Druga grupa stanowisk laboratoryjnych zawiera badaną broń, w której wprowadzono pewne modyfikacje (lecz nie są one trwałe i łatwo przywrócić broń do

stanu początkowego), obejmujące zazwyczaj wymianę któregoś z zespołów (lub części) na inny, umożliwiające wykonanie pożądanego pomiaru. Do trzeciej grupy są zaliczane stanowiska laboratoryjne wykorzystujące broń, która jest trwale zmodyfikowana i nie może być (w łatwy sposób) przywrócona do swojej pierwotnej (wyjściowej) postaci. Z kolei do czwartej grupy należą oryginalne, specjalistyczne stanowiska laboratoryjne, które nie bazują na konkretnym wzorze broni, lecz zostały specjalnie zaprojektowane i wykonane do pomiaru określonych parametrów lub obserwacji pożądanego zjawiska.

1.1.1. Stanowiska laboratoryjne zawierające badaną broń, w której nie wprowadzono żadnych modyfikacji

Stanowiska laboratoryjne z bronią, w której nie wprowadzono żadnych modyfikacji, pozwalają na badania charakterystyk mechanicznych i balistycznych broni oraz zjawisk zachodzących w broni podczas strzału, które (w większości przypadków) są możliwe do określenia (pomiaru) za pomocą czujników zewnętrznych lub systemów rejestrujących ruch, takich jak np. kamery szybkie. Badania te dotyczą m.in.: odrzutu, podrzutu, szybkostrzelności, celności, siły spustu oraz w ograniczony sposób również pracy mechanizmów broni (zależnie od jej układu konstrukcyjnego).

W rozprawie [9] oraz związanej z nią publikacją [10] opisano badania pistoletów i pistoletów maszynowych. Podczas badań wykorzystano uniwersalne uchwyty, które nie wymagają żadnej ingerencji w konstrukcję broni, i za pomocą kamery szybkiej rejestrowano przemieszczenie jej zespołu odrzucanego. Dodatkowo, z wykorzystaniem bramki optoelektronicznej, określano prędkość pocisku w odległości 3 m od wylotu lufy. Część uzyskanych wyników badań wykorzystano do walidacji opracowanego w ramach rozprawy modelu matematycznego pracy układu z zamkiem swobodnym.

Podobne badania, których obiektem był wielkokalibrowy karabin maszynowy Browning M2HB przedstawiono w rozprawie [11] oraz w powiązanych z rozprawą publikacjach i materiałach konferencyjnych [12÷14]. W badaniach tych wykorzystano uniwersalną podstawę strzelecką i specjalnie zaprojektowany zestaw uchwytów umożliwiający montaż karabinu. Za pomocą kamery szybkiej rejestrowano przemieszczenie zespołu odrzucanego karabinu, a za pomocą bramki optoelektronicznej wyznaczano prędkość pocisku na torze lotu. Wyniki zostały

wykorzystane do walidacji opracowanego w ramach rozprawy modelu matematycznego pracy układu z krótkim odrzutem lufy z przyspieszaczem.

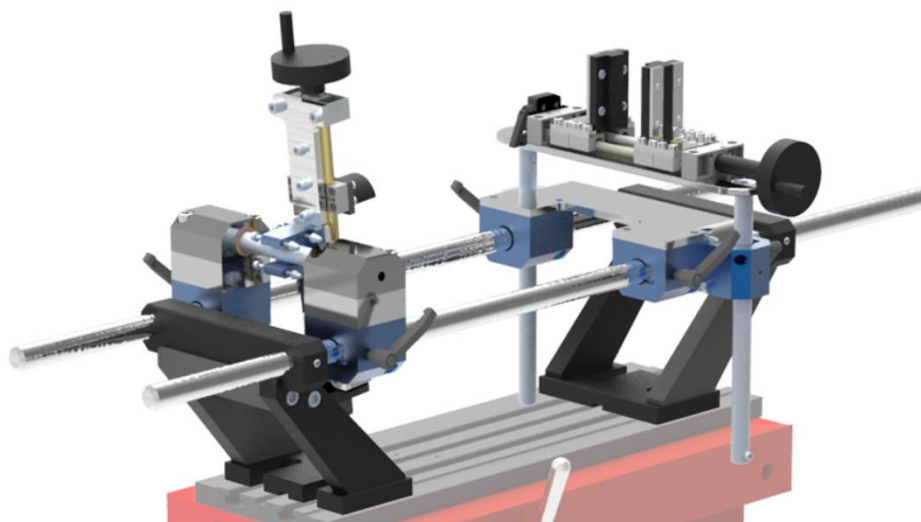
Poradnik [15], opracowany przez specjalne grypy zadaniowe działające pod egidą NATO, opisuje metody badań gotowego wyrobu (broni strzeleckiej). Zawarto w nim metodyki badań m.in.: celności broni, analizy kinematycznej części i zespołów, trwałości (badania żywotnościowe i środowiskowe), odrzutu itd. Ponadto, w poradniku przedstawiono przykładowe stanowiska laboratoryjne dla niektórych rodzajów opisanych badań. Jedno z nich, przeznaczone do badania odrzutu broni strzeleckiej zaprezentowano na fot. 1.1.



Fot. 1.1. Stanowisko laboratoryjne do badania odrzutu broni strzeleckiej [15]

W ramach przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych stanowisk laboratoryjnych i metod badania automatycznej broni strzeleckiej przeprowadzono również analizę patentową.

W patencie [16] (Chiny) przedstawiono uniwersalny uchwyt umożliwiający badanie pistoletów, natomiast w patencie [17] (Chiny) opisano podobne rozwiązanie konstrukcyjne, przeznaczone do badania karabinków i karabinów. Tego typu uchwyty są również oferowane na rynku komercyjnym przez firmy takie jak Prototypa-ZM (Czechy) czy HPI (Austria). Przykładem takiego uchwytu jest uniwersalny uchwyt do mocowania broni długiej HPI B290UMR (fot. 1.2)



Fot. 1.2. Uniwersalny uchwyt do mocowania broni długiej HPI B290UMR [18]

Stosunkowo duża liczba opatentowanych rozwiązań konstrukcyjnych dotyczy badań zjawiska odrzutu broni. W patencie [19] (Chiny) opisano uniwersalne stanowisko laboratoryjne do badania siły odrzutu w broni długiej. Siła ta jest mierzona czujnikiem siły, o który oparta jest kolba zamontowanej w stanowisku broni. Patent [20] (Chiny) prezentuje uchwyt umożliwiający zamontowanie pistoletu. W uchwycie znajduje się zintegrowany czujnik siły znajdujący się pod bronią. Podobne przeznaczenie ma opisane w [21] (Chiny) stanowisko laboratoryjne, z tą różnicą, że w konstrukcji tej, czujnik siły jest zamontowany za bronią. Z kolei patent [22] (Korea Południowa) przedstawia stanowisko laboratoryjne do badania przemieszczenia broni podczas strzału. W tym rozwiązaniu broń jest zamontowana swobodnie, a pomiar przemieszczenia realizowany jest za pomocą czujnika elektromagnetycznego i nawijanej na lufę cewki. W patencie [23] (Chiny) przedstawiono stanowisko laboratoryjne do pomiaru energii odrzutu karabinów maszynowych. Karabin umieszcza się na wózku umożliwiającym swobodny ruch i mierzony jest czas, po jakim broń mija kolejno trzy czujniki położenia.

Kolejna grupa stanowisk do badania automatycznej broni strzeleckiej (fabrycznej, bez wprowadzania w niej modyfikacji) obejmuje stanowiska do pomiaru siły spustu. Patenty [24] (Niemcy) oraz [25] (USA) przedstawiają mechaniczne urządzenia do pomiaru charakterystyk spustu. Obecnie jednak, nie stosuje się już mechanicznych urządzeń tego typu, a na rynku są dostępne ich elektroniczne odpowiedniki, takie jak np. zdalne urządzenie spustowe ze zintegrowanym pomiarem charakterystyk spustu REFICO-F oferowane przez czeską firmę Protorypa-ZM (fot. 1.3).



Fot. 1.3. Zdalne urządzenie spustowe ze zintegrowanym pomiarem charakterystyk spustu REFICO-F [26]

Określenie (obliczenie) szybkostrzelności broni można obecnie realizować kilkoma sposobami. Pierwszy z nich wykorzystuje wynik rejestracji przemieszczenia elementów ruchomych mechanizmów broni za pomocą kamer szybkich lub czujników przemieszczenia (np. laserowych), natomiast drugi – interwały czasowe pomiędzy kolejnymi rejestracjami pocisków przelatujących przez bramki prędkościowe. Przykładem urządzenia z taką funkcją jest bramka LS-01 oferowana przez czeską firmę Protorypa-ZM. Ta sama firma oferuje również urządzenie akustyczne (ROFAM) przeznaczone do wyznaczania szybkostrzelności broni.

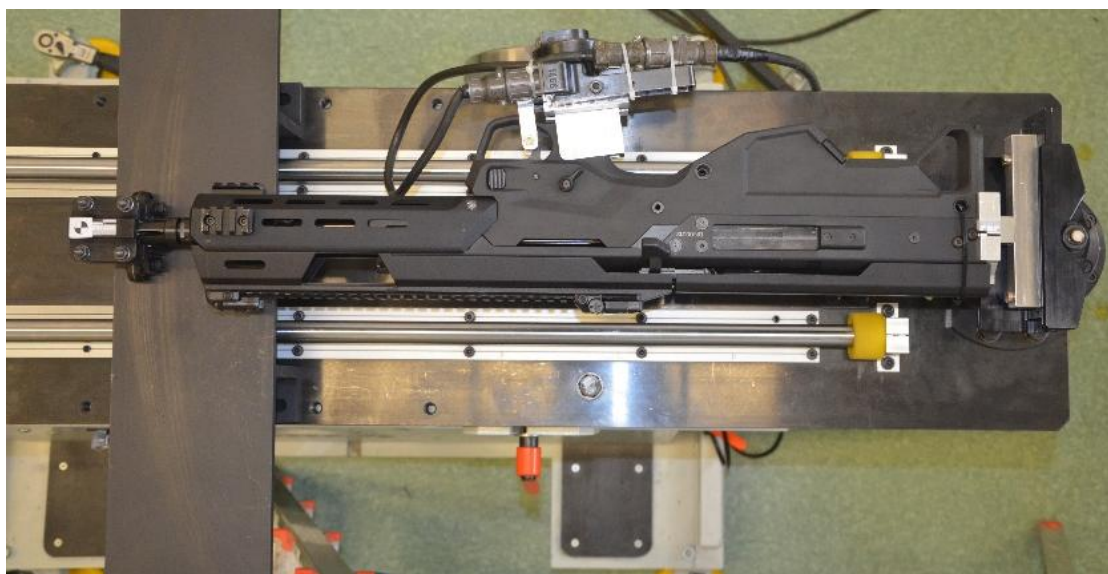
1.1.2. Stanowiska laboratoryjne zawierające badaną broń, w której wprowadzono modyfikacje (nietrwale)

Druga grupa stanowisk laboratoryjnych zawiera badaną broń, w której wprowadzono pewne modyfikacje, przy czym są one nietrwale (odwracalne). Modyfikacje dotyczą zazwyczaj wymiany któregoś z zespołów (podzespołów) broni na taki, który umożliwi pomiar żądanego parametru (np. wymiana suwadła na suwadło wyposażone w powierzchnię przygotowaną do współpracy z czujnikiem przemieszczenia), bądź pozwoli na wyizolowanie pewnego zjawiska (np. wymiana kolby na inną, która nie będzie wprowadzała dodatkowych zakłóceń).

W rozprawie doktorskiej [27] i związanymi z nią publikacjami [28÷35] sformułowano model matematyczny odrzutu i podrzutu automatycznej broni strzeleckiej. W celu pozyskania wyników służących do zwalidowania tego modelu, opracowano

stanowisko laboratoryjne do badań parametrów odrzutu i/lub podrzutu broni strzeleckiej (fot. 1.4). Stanowisko jest oryginalnym, opatentowanym rozwiązaniem [36], służącym głównie do badania dwóch zjawisk występujących w broni strzeleckiej podczas strzału: odrzutu i podrzutu. Aby przeprowadzić badania na tym stanowisku należy wcześniej odpowiednio przystosować broń poprzez zamontowanie elektropustu (w miejsce chwytu) oraz adaptera (w miejsce kolby).

Parametry podrzutu broni mogą być określane dwoma sposobami. Pierwszy wykorzystuje enkoder⁴, przekształcający zmianę kąta w ustalonej osi obrotu na sygnał cyfrowy, natomiast drugi – kamerę szybką i późniejszą analizę zarejestrowanych zdjęć. Z kolei parametry odrzutu broni są określane tylko z wykorzystaniem kamery do zdjęć szybkich. Stanowisko umożliwia również prowadzenie badań urządzeń wylotowych, mających na celu określenie ich efektywności (sprawności). Niektóre wyniki badań urządzeń wylotowych na opisywanym stanowisku przedstawiono w [37].

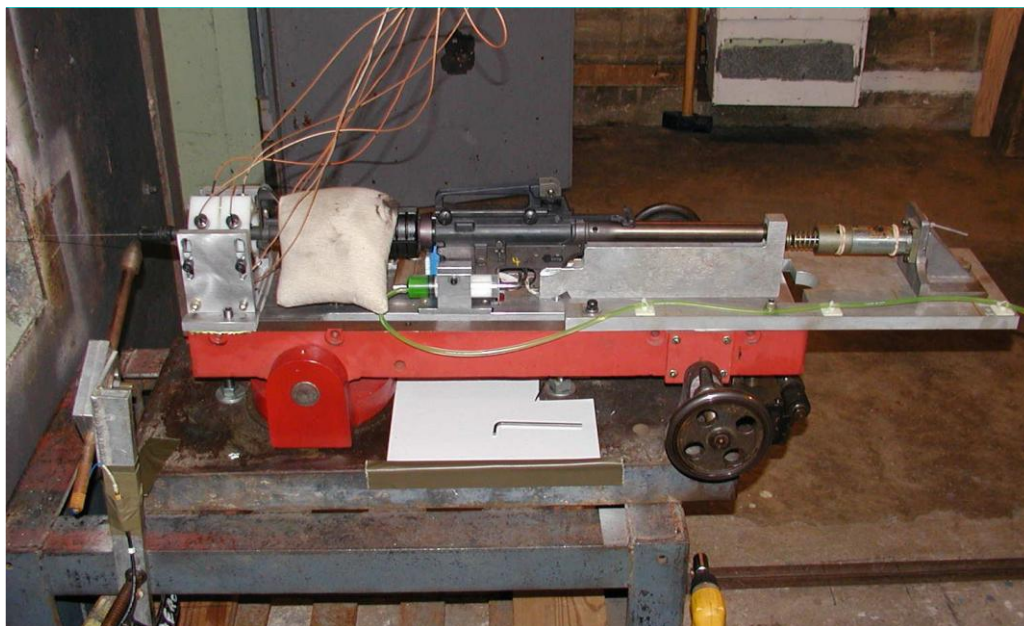


Fot. 1.4. Stanowisko laboratoryjne do badań parametrów odrzutu i/lub podrzutu broni strzeleckiej

W opracowaniu [38] przedstawiono wyniki badań celności i podrzutu broni zasilanej amunicją pośrednią 5,56x45 mm z pociskiem M855. Do badań wykorzystano stanowisko laboratoryjne (fot. 1.5) z zamontowanym 5,56 mm karabinkiem M4 (USA), w którym w miejsce kolby i urządzenia powrotnego zainstalowano specjalnie zaprojektowany cylinder ze sprężyną. Podczas strzału przemieszczenie lufy broni było

⁴ Enkoder to urządzenie, które przetwarza ruch mechaniczny, na cyfrowy lub analogowy sygnał elektryczny, który może być odczytany przez inne urządzenia.

mierzone za pomocą czujników wirowoprądowych umieszczonych na wysokości wylotu lufy.



Fot. 1.5. Karabinek M4 zamontowany na stanowisku laboratoryjnym do badania podzutu broni [38]

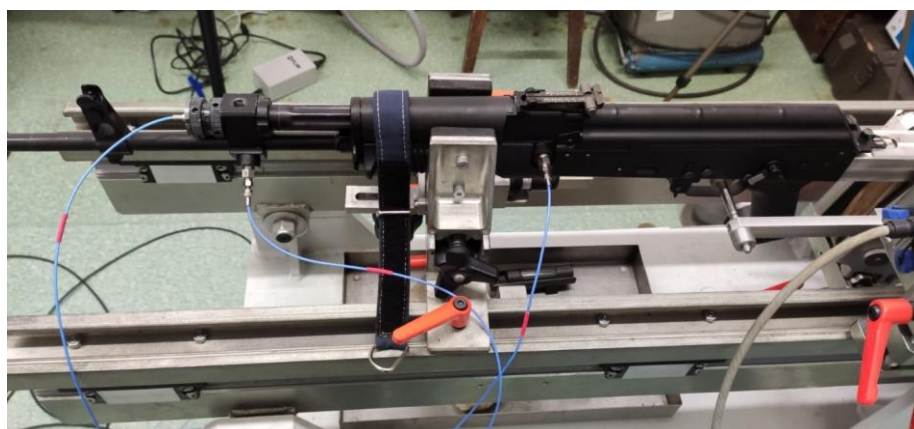
1.1.3. Stanowiska laboratoryjne zawierające broń, która jest trwale zmodyfikowana

Stanowiska laboratoryjne zaliczane do trzeciej grupy zawierają broń, która została poddana głębokiej i nieodwracalnej modyfikacji. Taka modyfikacja może polegać, na przykład na wykonaniu wycięć w korpusie broni (umożliwiających obserwację pracujących mechanizmów), gniazd (przeznaczonych do montażu czujników ciśnienia), czy przystosowaniu broni do wykorzystania dodatkowych części i zespołów. Stanowiska tego typu, w odróżnieniu od dwóch pierwszych, umożliwiają pomiar parametrów i obserwację zjawisk, które mają miejsce wewnątrz broni podczas strzału. Przykładem mogą tu być przebiegi ciśnienia gazów prochowych w lufie i komorze gazowej.

W pracach [39] i [40] przedstawiono model matematyczny pracy układu z odprowadzeniem części gazów prochowych. Model ten sformułowano na podstawie parametrów konstrukcyjnych 5,56 mm karabinka M16A1 (USA), a do jego walidacji wykorzystano stanowisko laboratoryjne z tym samym, lecz zmodyfikowanym karabinkiem. Modyfikacja broni polegała na wykonaniu trzech gniazd do mocowania czujników ciśnienia: pierwsze gniazdo usytuowano w komorze gazowej, drugie –

w lufie tuż przed komorą naboju, a trzecie – na wysokości oryginalnego otworu gazowego. Karabinek był podwieszony za pomocą sześciu linek stalowych, zapewniając przemieszczenie broni z minimalnym tarcieniem oraz umożliwiając pomiar przemieszczenia broni podczas strzału. Sposób pomiaru tego przemieszczenia opisano w [41].

W patencie [42] przedstawiono stanowisko laboratoryjne do badań optymalizacyjnych węzła gazowego broni działającej na zasadzie odprowadzenia części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie (fot. 1.6). Stanowisko to wykorzystuje polski 5,56 mm karabinek wz. 1996 Beryl, w którym dokonano wielu zmian. Między innymi, w lufie karabinka wykonano dwa gniazda służące do montażu czujników ciśnienia, przy czym jedno – umiejscowiono na końcu komory naboju, a drugie – na wysokości otworu gazowego produkowanego seryjnie karabinka Beryl.



Fot. 1.6. Stanowisko laboratoryjne do badań optymalizacyjnych węzła gazowego

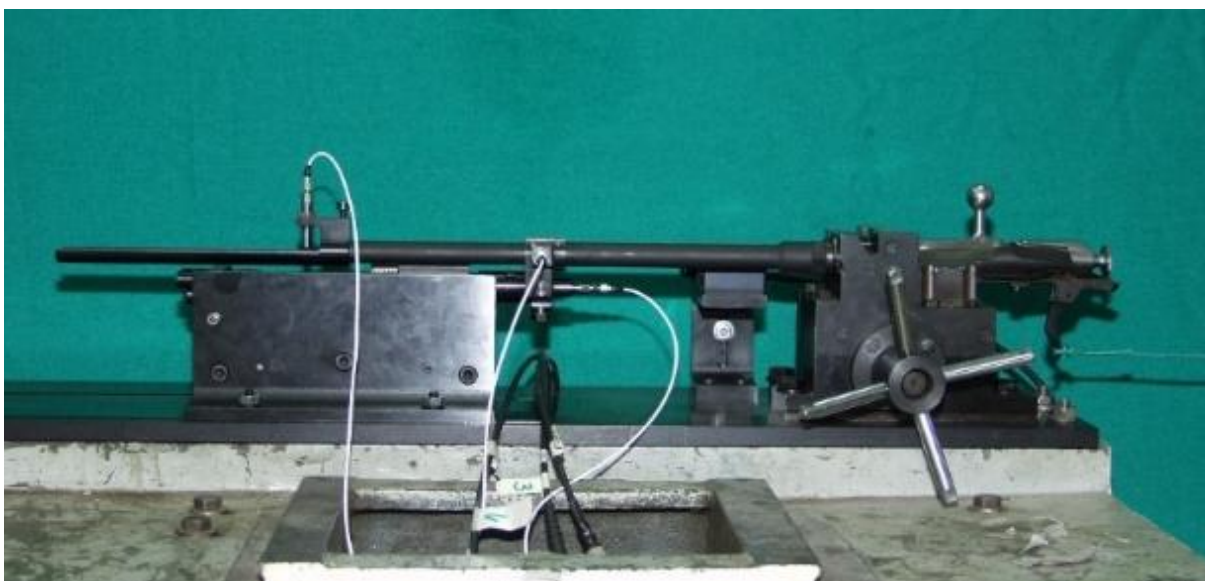
Komorę gazową karabinka zastąpiono komorą o regulowanej objętości, z możliwością zmiany geometrii i średnicy otworu gazowego. W zmodyfikowanej komorze gazowej znajduje się gniazdo przeznaczone do montażu kolejnego, trzeciego czujnika ciśnienia. W karabinku zastosowano również zespół tłoczyska z tłokiem gazowym o regulowanej długości. Podczas prowadzenia badań, obok pomiarów wartości ciśnienia, rejestrowano również – z wykorzystaniem laserowego przetwornika przemieszczenia – drogę suwadła w funkcji czasu podczas strzału.

1.1.4. Specjalistyczne stanowiska laboratoryjne

Czwarta grupa stanowisk laboratoryjnych to urządzenia specjalnie zaprojektowane pod kątem badania konkretnych zjawisk występujących w broni palnej podczas strzału.

Fakt, że projektanci tego typu stanowisk nie są ograniczeni konstrukcją broni (tak jak ma to miejsce przypadku stanowisk opisanych w podrozdziałach 1.1.1÷1.1.3), stwarza znacznie większe możliwości badawcze zarówno w obszarze parametryzacji, jak i regulacji takich urządzeń w szerokim zakresie. To z kolei sprzyja prowadzeniu badań pod kątem optymalizacji konkretnych mechanizmów, zespołów i podzespołów, które mogą być później wykorzystane w procesie projektowania nowych wzorów broni.

W rozprawie doktorskiej [43] sformułowano model matematyczny pracy automatycznej broni palnej z odprowadzeniem części gazów prochowych. Częściowe wyniki badań uzyskanych podczas realizacji rozprawy opublikowano w pracach [44÷51]. W celu przeprowadzenia walidacji modelu matematycznego zaprojektowano i wykonano oryginalne stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki karabinka działającego na zasadzie odprowadzenia części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie [52]. Stanowisko (fot. 1.6) umożliwia wielowariantową konfigurację układu badawczego w zakresie: węzła gazowego o zmiennej konfiguracji, luf o różnej długości, suwadeł o różnej masie, urządzeń powrotnych o różnej charakterystyce, zespołów odrzucanych z możliwością zmiany ich mas oraz zderzaków o różnych współczynnikach odbicia. Węzeł gazowy zawiera wymienne: tłok, pierścienie odległościowe tłoka gazowego i cylindra gazowego oraz dysze i wkrętki upustowe o różnej średnicy. Stanowisko pozwala wykonywać pomiary: ciśnienia w przewodzie lufy (na wysokości otworu gazowego) i w komorze gazowej, drogi zespołu odrzucanego oraz chwili wylotu pocisku z lufy.



Fot. 1.6. Stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki karabinka działającego na zasadzie odprowadzenia gazów (fot. Małgorzata Pac)

W patencie [53] (Chiny) przedstawiono stanowisko laboratoryjne do badania automatyki broni palnej bez konieczności używania amunicji bojowej. Stanowisko to umożliwia wyseparowanie poszczególnych cykli pracy mechanizmów i analizowanie ich oddzielnie. Z kolei w patencie [54] (Chiny) opisano stanowisko laboratoryjne do badania siły niezbędnej do odryglowania broni. Ciekawe rozwiązanie techniczne przedstawiono również w patencie [55] (Chiny), w którym zaprezentowano urządzenie do analizy kluczowych parametrów wpływających na ergonomię broni, takich jak rozmieszczenie manipulatorów czy położenie środka masy.

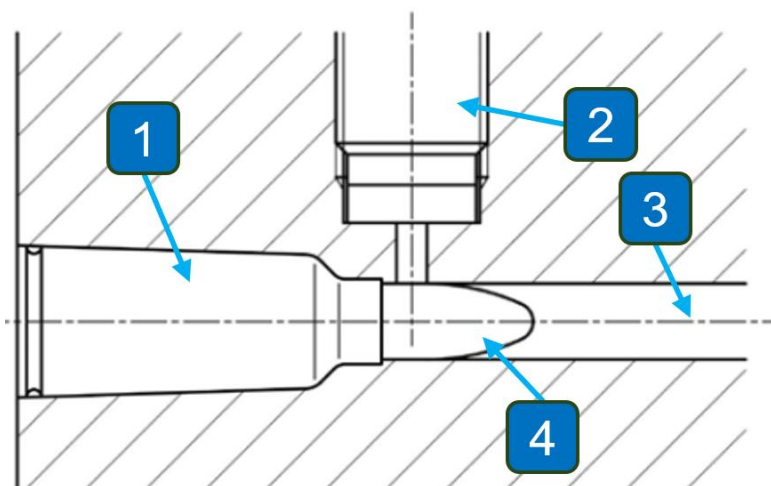
1.2. Analiza literatury w zakresie badań amunicji strzeleckiej

Badania amunicji strzeleckiej mają dwa główne cele poznawcze. Pierwszym z nich jest sprawdzenie, czy jej użycie jest bezpieczne zarówno dla użytkownika, jak i dla broni, w której zostanie wykorzystana. Drugim zaś celem jest sprawdzenie, czy jej parametry odpowiadają tym, które zostały określone na etapie projektowania. W związku z zakładanym zakresem badań amunicji, które były przeprowadzone w ramach niniejszej pracy, analizę literatury ograniczono do problematyki pomiarów ciśnienia w przewodzie lufy (w przestrzeni zapociskowej przewodu lufy) oraz określania prędkości pocisku na torze lotu.

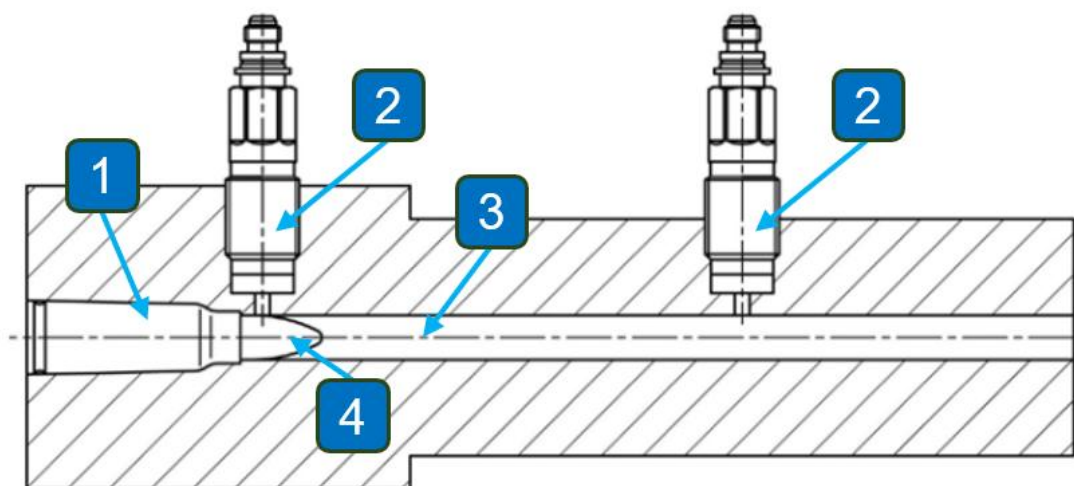
1.2.1. Pomiar ciśnienia w przewodzie lufy

W Europie najczęściej stosowane są dwa główne sposoby pomiaru ciśnienia gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej przewodu lufy broni strzeleckiej podczas strzału. Pierwszy sposób – zgodny z tzw. standardem NATO EPVAT⁵ [56] – polega na pomiarze ciśnienia bezpośrednio za krawędzią wlotu łuski (rys. 1.2). Dokument ten opisuje również sposób pomiaru ciśnienia w dwóch punktach pomiarowych w lufie (rys. 1.3). Pomiar drugim czujnikiem jest wykonywany na wysokości występowania otworu gazowego, z którego pobierane są gazy prochowe wykorzystywane do napędzania mechanizmów automatyki broni. Odpowiednie ciśnienie, występujące na wysokości tego otworu jest krytyczne dla prawidłowego działania tych mechanizmów.

⁵ EPVAT (ang. Electronic Pressure, Velocity and Action Time) – spójna część standardu [56] opisująca pomiary ciśnienia w przewodzie lufy, prędkości pocisku na torze lotu oraz czasu od zainicjowania strzału do wylotu pocisku z lufy. Nazwy NATO, EPVAT lub NATO EPVAT są używane zamiennie w odniesieniu do tego standardu badania amunicji.



Rys. 1.2. Schemat przedstawiający umiejscowienie czujnika ciśnienia względem naboju przy pomiarze ciśnienia zgodnie ze standardem NATO EPVAT: 1 – łuska, 2 – czujnik ciśnienia, 3 – przewód lufy, 4 – pocisk (opracowano na podstawie [57])

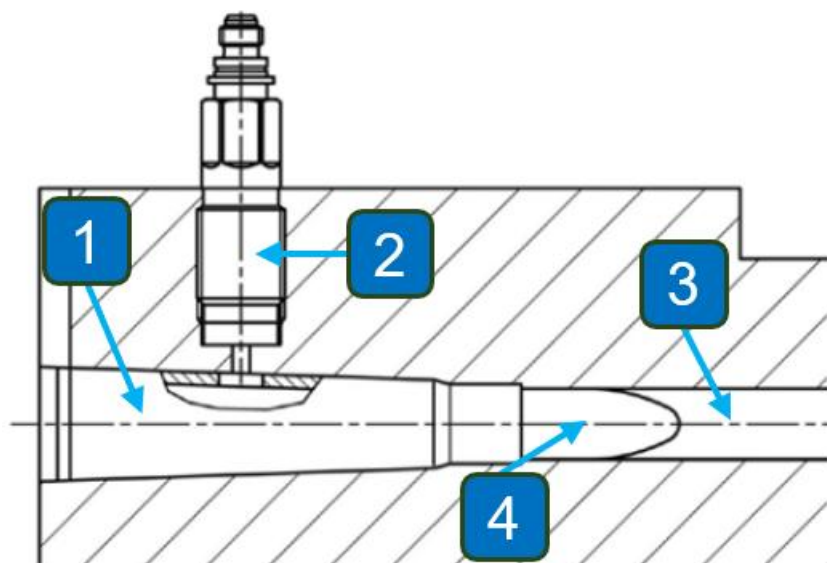


Rys. 1.3. Schemat przedstawiający umiejscowienie dwóch czujników ciśnienia w lufie przy pomiarze ciśnienia zgodnie ze standardem NATO EPVAT: 1 – łuska, 2 – czujniki ciśnienia, 3 – przewód lufy, 4 – pocisk (opracowano na podstawie [57])

Drugi sposób pomiaru ciśnienia w przewodzie lufy stosowany w Europie – zgodny z tzw. standardem CIP⁶ [58] – polega na pomiarze ciśnienia występującego w łusce naboju (rys. 1.4). Stosowanie do pomiarów ciśnienia gazów prochowych standardu CIP wiąże się z koniecznością przygotowania amunicji do badań, polegającą na wywierceniu w ścianie łuski otworu, który jest usytuowany w ściśle określonej odległości mierzonej od płasku wlotowego lufy. Dodatkowo, wymagane jest stosowanie dodatkowych membran zabezpieczających, które chronią czujnik ciśnienia

⁶ CIP – międzynarodowa organizacja *The Commission internationale permanente pour l'épreuve des armes à feu portatives* (z ang. *Permanent International Commission for the Proof of Small Arms*).

przed palącymi się ziarnami prochu oraz skokowym wzrostem temperatury. Standard CIP (przedstawiony w postaci tabel) jest głównie wykorzystywany do badania amunicji przeznaczonej na rynek cywilny.



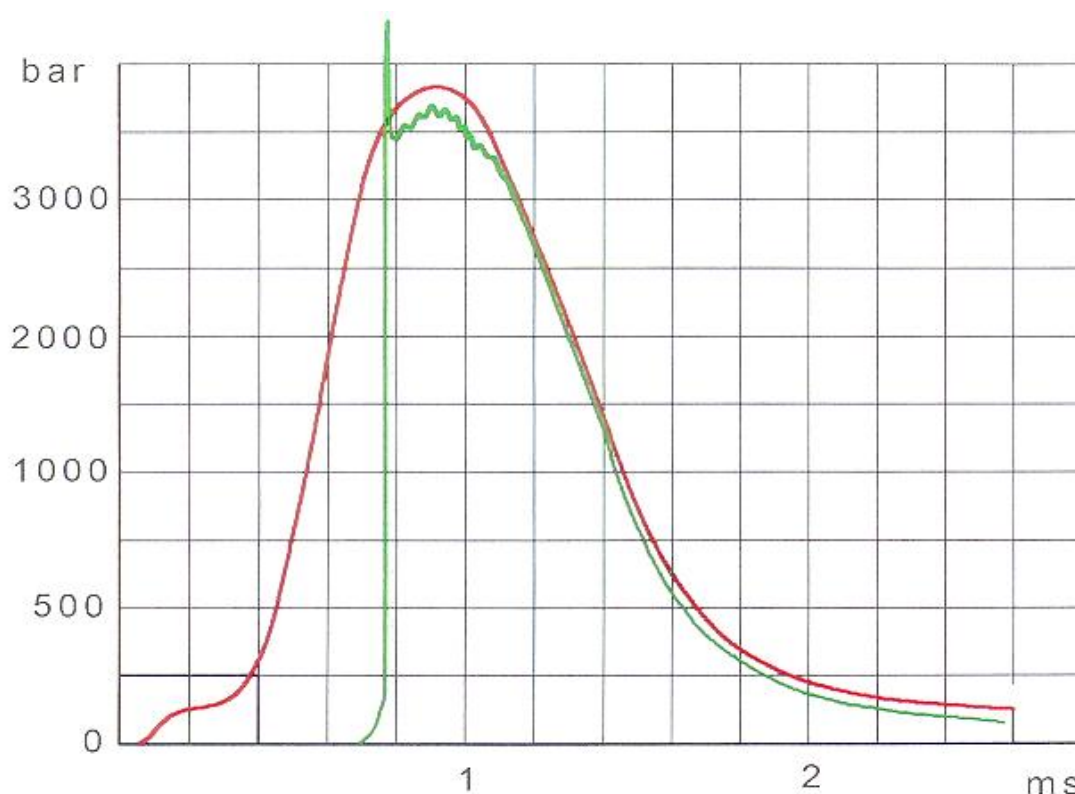
Rys. 1.4. Schemat przedstawiający umiejscowienie czujnika ciśnienia względem naboju przy pomiarze ciśnienia zgodnie ze standardem CIP: 1 – łuska, 2 – czujnik ciśnienia, 3 – przewód lufy, 4 – pocisk (opracowano na podstawie [57])

Podobnie do standardów CIP, są wykonywane badania według amerykańskich standardów SAAMI⁷ [59÷63]. W odróżnieniu od CIP, standardy SAAMI dopuszczają stosowanie czujników ciśnienia, takich jak PCB 117B, które podczas pomiaru stykają się z powierzchnią łuski. Pozwala to mierzyć ciśnienie wewnątrz łuski bez konieczności wykonywania w niej otworów (jak ma to miejsce w standardach CIP).

Pomiar ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy według standardu NATO umożliwia szybsze i prostsze (niż według CIP) prowadzenie pomiarów. Jednak jego wadą jest to, że ciśnienie mierzone za wlotem łuski jest niższe od ciśnienia występującego wewnątrz łuski naboju (tzw. ciśnienie denne). Autorzy publikacji [64] oraz [65], na podstawie pomiarów wykonanych z wykorzystaniem luf balistycznych w dwóch standardach oraz badań teoretycznych wnioskuje, że różnica ta może wynosić nawet kilkanaście procent. Co więcej, w przypadku pomiarów według standardu NATO nie można zarejestrować początkowej fazy wzrostu ciśnienia, a jego przebieg jest dużo bardziej zakłócony i wymaga zaawansowanej obróbki. Przykładowe

⁷ SAAMI – stowarzyszenie amerykańskich producentów broni palnej i amunicji, z ang. *Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute*.

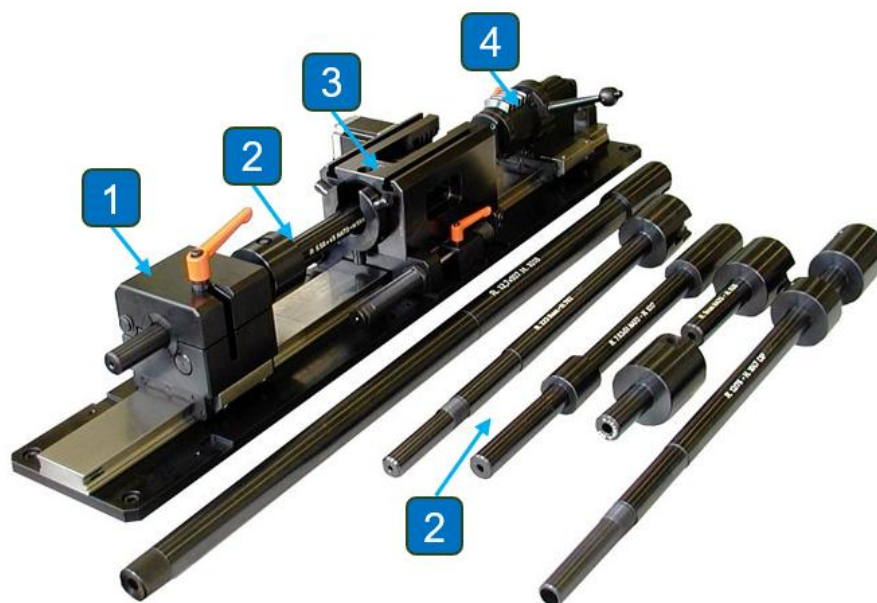
przebiegi ciśnienia p w funkcji czasu t uzyskane z pomiarów wykonanych zgodnie ze standardami CIP i standardem NATO EPVAT przedstawiono na rys. 1.5.



Rys. 1.5. Przykładowe przebiegi ciśnienia p w funkcji czasu t uzyskane z pomiarów wykonanych zgodnie ze standardami CIP (kolor czerwony) i standardem NATO EPVAT (kolor zielony) [66]

W związku z tym, że wyniki badań amunicji, które były przeprowadzone w ramach niniejszej pracy doktorskiej wykorzystano w procesie wytrzymałościowego projektowania elementów stanowiska laboratoryjnego oraz wstępnej weryfikacji modelu matematycznego opracowanego w ramach [2], zdecydowano o przeprowadzeniu badań zgodnie ze standardem CIP.

Do przeprowadzenia badań amunicji, w tym do pomiaru ciśnienia gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej przewodu lufy, niezbędny jest specjalistyczny osprzęt i aparatura pomiarowo-rejestrująca. W skład takiego osprzętu wchodzi m.in. zamki balistyczne z nasadami zamkowymi oraz pasujące do nich lufy balistyczne. Lufy tego typu mają wykonane w odpowiednich miejscach (zależnych od standardu, według którego są prowadzone badania) gniazda przeznaczone do montażu w nich czujników ciśnienia. Obecnie producenci osprzętu badawczego, tacy jak firma HPI, czy Prototypa, oferują bogaty asortyment, przeznaczony do badań prowadzonych zgodnie ze standardami CIP i NATO EPVAT (fot. 1.7).



Fot. 1.7. Osprzęt do wykonywania badań amunicji oferowany przez czeską firmę Prototypa:
 1 – uchwyt lufy, 2 – lufy, 3 – uniwersalna nasada zamkowa, 4 – uniwersalny zamek balistyczny (opracowano na podstawie [67])

Obecnie do pomiarów ciśnienia w przewodzie lufy wykorzystuje się piezoelektryczne przetworniki ciśnienia. W odróżnieniu do stosowanych niegdyś zgniotków⁸, czujniki tego typu pozwalają na rejestrację całego przebiegu ciśnienia w przewodzie lufy podczas strzału. Zasadniczo, wyróżnia się dwa typy piezoelektrycznych przetworników ciśnienia: aktywne (ICP) i pasywne.

Przetworniki ICP są wyposażone w integralne podzespoły elektroniczne, które przetwarzają wysokoimpedancyjny sygnał ładunkowy (generowany przez piezoelement) na niskoimpedancyjny sygnał napięciowy. Zaletą takich czujników jest możliwość stosowania długich przewodów pomiarowych, a ponadto brak potrzeby stosowania wzmacniaczy ładunku (jak w przypadku przetworników pasywnych). Przetworniki te wymagają jednak dodatkowego zasilania. Co więcej, ich istotną wadą jest ograniczenie maksymalnej temperatury pracy do około 180°C. W związku z tym, że zjawisko strzału wiąże się z występowaniem większych wartości maksymalnej temperatury podczas pomiaru, przetworniki aktywne nie są powszechnie stosowane w badaniach amunicji.

⁸ Specjalnie przygotowany i skalibrowany element, który ulega odkształceniu na skutek oddziaływania ciśnienia. Liniowy pomiar tego odkształcenia pozwala na odczytanie z tabel średniego maksymalnego ciśnienia, które wystąpiło w przewodzie lufy podczas strzału. Średnie maksymalne ciśnienie jest niższe od maksymalnego ciśnienia.

Przetworniki pasywne (w odróżnieniu od aktywnych) nie są wyposażone w zintegrowane układy elektroniczne, a ich sygnałem wyjściowym jest wysokoimpedancyjny sygnał ładunkowy. W przypadku użycia tych czujników wymagane jest stosowanie wzmacniaczy ładunku w torze pomiarowym. Dodatkowo, ze względu na rodzaj generowanego sygnału, pomiar czujnikami tego typu jest wrażliwy na stan techniczny oraz długość przewodów pomiarowych. Czujniki pasywne są mniej wrażliwe na zmiany temperatury od czujników aktywnych. Dokument standaryzacyjny [56] wymaga stosowania jednego z dwóch typów czujników pasywnych do prowadzenia pomiarów ciśnienia w przewodzie lufy – Kistler 6215 lub HPI GP6.

Na podstawie przeprowadzonej analizy patentowej, na uwagę zasługują trzy patenty urządzeń służących do badania amunicji. W patencie [68] (USA) przedstawiono zamek balistyczny z nasadą zamkową umożliwiającą prowadzenie badań amunicji z wykorzystaniem różnych luf balistycznych. Mimo, że patent jest stosunkowo nowy (2024 r.) opisana w nim konstrukcja przypomina hybrydę rozwiązań oferowanych obecnie przez firmę Prototypa, a w przeszłości – przez firmę AVL (obecnie HPI). Z kolei w patencie [69] (USA) przedstawiono skręcaną tuleję służącą do montażu w niej luf balistycznych. Zamek w tym przypadku jest nakręcany na gwint wykonany w dolnej części tej tulei. Rozwiązanie przedstawione w patencie [70] (Niemcy) również przedstawia pewną formę uniwersalnego urządzenia do badania amunicji. Jego cechą charakterystyczną jest to, że komora naboju nie jest tutaj elementem wykonanym w lufie (typowe rozwiązanie), a osobnym podzespołem, który można wymieniać.

1.2.2. Określanie prędkości pocisku na torze lotu

Prędkość pocisku na torze lotu jest jednym z najważniejszych parametrów, który charakteryzuje amunicję. Ma ona wpływ m.in. na celność pocisku, jego zasięg skuteczny i zdolność do oddziaływania na cel. Co więcej, prędkość kątowna pocisku na wylocie lufy ma istotny wpływ na prawidłową stabilizację pocisku na torze lotu. Znajomość prędkości pocisku podczas strzału jest niezbędna do zapewnienia prawidłowego funkcjonowania systemów kierowania ogniem oraz programowania zapalników czasowych.

Zgodnie z normą [71] prędkość pocisku jest wektorem równym pochodnej wektora charakteryzującego położenie środka ciężkości pocisku względem czasu w odniesieniu do przyjętego układu współrzędnych. Norma definiuje cztery rodzaje prędkości pocisku: V_0 , V_w , V_{max} i V_{rad} .

Prędkość początkowa pocisku V_0 to pewna umowna prędkość, którą powinien mieć pocisk w punkcie wylotu, aby bez uwzględniania wpływu gazów prochowych, jego prędkość po okresie powylotowego działania gazów prochowych była równa prędkości rzeczywistej. **Prędkość wylotowa pocisku V_w** to prędkość, jaką posiada pocisk w chwili wylotu z lufy. **Prędkość maksymalna pocisku V_{max}** to prędkość jaką osiągnie pocisk po wylocie z lufy na skutek powylotowego działania gazów prochowych. **Prędkość radialna pocisku V_{rad}** to wektor będący pochodną wektora wodzącego względem czasu.

Podczas prowadzenia badań, mających na celu określenie prędkości pocisku zazwyczaj stosuje się również prędkość V_x , która jest prędkością, jaką osiąga pocisk w odległości x mierzonej względem wylotu lufy. W badaniach prowadzonych w ramach [72] dowiedziono, że prędkość pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy (V_2) różni się od V_w pocisku tylko o około 1%. Ma to duże znaczenie w badaniach prowadzonych w ramach niniejszej pracy doktorskiej, ponieważ ich wyniki wykorzystano w procesie weryfikacji i walidacji modelu matematycznego, realizowanego w [2].

Obecnie stosuje się kilka metod określania prędkości pocisku na torze lotu, a najpopularniejsza wykorzystuje bramki optoelektroniczne. Tego typu urządzenia są wyposażone w co najmniej dwa zestawy nadajników i odbiorników optoelektronicznych rejestrujących chwilę, w której pocisk przecina ich płaszczyznę pomiarową. Różnica czasu pomiędzy rejestracją pocisku na poszczególnych odbiornikach, przy znanej odległości pomiędzy nimi, pozwala na obliczenie prędkości pocisku.

Podobnie działają bramki elektromagnetyczne, z tą różnicą, że inaczej odbywa się rejestracja przelatującego pocisku. W brankach elektromagnetycznych wykorzystywany jest efekt generacji prądów wirowych w pocisku przez cewkę nadawczą, co powoduje zmianę pola magnetycznego indukowanego na cewce odbiorczej.

Kolejną grupą urządzeń, która jest wykorzystywana do określania prędkości pocisku są radary i chronografy wykorzystujące efekt Dopplera, czyli zmiany

częstotliwości fali odbitej lub emitowanej przez poruszające się źródło w stosunku do częstotliwości fali pierwotnej. Ze względu na powstawanie wielu fal odbitych, określanie prędkości pocisku z wykorzystaniem tego typu urządzeń nie jest stosowane w badaniach odbywających się w pomieszczeniach zamkniętych.

Inny, szeroko stosowany sposób określania prędkości pocisku na torze lotu wykorzystuje zdjęcia wykonane za pomocą kamer szybkich. Odpowiednio oznaczając obszar pomiaru (wzornik o znanej długości) i znając czas, który upłynął pomiędzy kolejnymi klatkami nagrania, można obliczyć prędkość pocisku.

1.3. Analiza literatury w zakresie planowania eksperymentu (DoE)

Ze względu na to, że istotne znaczenie w niniejszej rozprawie doktorskiej miały wyniki badań instrumentalnych, kluczowe było merytoryczne uzasadnienie wyboru odpowiedniej metody planowania eksperymentu.

Ekspertyment polega na przeprowadzeniu serii pomiarów w celu określenia, jak zmienne wejściowe i czynniki zakłócające wpływają na wielkości wyjściowe. Z kolei planowanie eksperymentu (z ang. *Design of Experiments* – DoE) to powszechnie stosowany w nauce zbiór narzędzi i procedur mających na celu optymalizację procesu prowadzenia badań naukowych, które pomagają wybrać najefektywniejsze doświadczenia do osiągnięcia zamierzonego celu [73]. Jedną z głównych zalet DoE jest znaczne zmniejszenie liczby pomiarów potrzebnych do sformułowania adekwatnego modelu matematycznego analizowanego obiektu, co skutkuje znaczną redukcją kosztów prowadzenia badań.

Rozwój teorii planowania eksperymentu został zapoczątkowany w latach 20. XX wieku przez R. A. Fishera [74], który – pracując w Rothamsted Research w Anglii – po raz pierwszy przedstawił koncepcję DoE. Jego badania koncentrowały się na zastosowaniu analizy statystycznej w rolnictwie, szczególnie w kontekście wpływu różnych czynników na wysokość plonów. Wyniki swoich prac zaprezentował m.in. w publikacjach [75] i [76]. Od tego czasu dziedzina planowania eksperymentu intensywnie się rozwija, a jej kulminacja nastąpiła w 1951 roku. Wówczas G. E. P. Box oraz K. B. Wilson opracowali metodologię powierzchni odpowiedzi (z ang. *response surface methodology* – RSM) [77], która szybko stała się jednym z najpopularniejszych narzędzi w tej dziedzinie, znacząco zwiększając zainteresowanie naukowców

wykorzystaniem DoE podczas prowadzenia badań naukowych.

Obecnie, planowanie eksperymentu jest szeroko stosowane w różnych dziedzinach nauki i techniki, a niektóre przykłady zastosowań DoE w ostatnich kilkunastu latach przedstawiono poniżej.

Opracowanie [78] przedstawia zastosowanie DoE w optymalizacji parametrów druku 3D w obszarze wytwarzania materiałów biomedycznych. Artykuł [79] opisuje zastosowanie DoE w modelowaniu procesów fermentacji występujących w produkcji leków, a opracowanie [80] prezentuje przegląd artykułów dotyczących zagadnienia mikrokapsułkowania. Planowanie eksperymentu jest również wykorzystywane w branży spożywczej i około spożywczej. Przegląd [81] dotyczy artykułów związanych z wykorzystaniem DoE do modelowania smaku jedzenia, a artykuł [82] zawiera obserwacje dotyczące wykorzystania metod statystycznych w nauce o żywności. Ostatnio wzrasta również wykorzystanie tych narzędzi w analizie kryminalistycznej. Przegląd [83] odnosi się do czterdziestu recenzowanych artykułów, które poruszają ten problem. Ponadto, w artykule [84] przedstawiono zastosowanie DoE w dziedzinie toksykologii sądowej. Z kolei cykl artykułów [85÷87] opisuje zastosowanie narzędzi planowania eksperymentu do optymalizacji procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwach średniej wielkości. Opracowanie [88] przedstawia możliwe zastosowania DoE i wynikające z tego korzyści w dziedzinie kontroli jakości.

DoE jest wykorzystywane również w dynamicznie rozwijających się w ostatnich latach dziedzinach, tj. energii odnawialnej i ochronie środowiska. W artykule [89] opisano zastosowanie metod DoE w procesie optymalizacji wydajności chłodzenia silnika odrzutowego. Z kolei artykuł [90] przedstawia metodologię, która ma zapewnić lepsze zrozumienie i pogłębienie wiedzy na temat wpływu i interakcji różnych architektonicznych i technicznych czynników projektowych wpływających na charakterystykę energetyczną budynku. Kilka innych zastosowań DoE w dziedzinie energii odnawialnej i ochrony środowiska przedstawiono w opracowaniach [91÷93].

DoE wykorzystuje się również w procesie obróbki metali i pomiaru parametrów z tym związanych, takich jak np. pomiar chropowatości powierzchni [94]. Przegląd [95] przedstawia obszerną analizę literatury w zakresie projektowania eksperymentów komputerowych, a w podsumowaniu prezentuje potencjalne możliwości dla przyszłych nowoczesnych badań wykorzystujących DoE.

Przeprowadzona analiza literaturowa w obszarze planowania eksperymentu wykazała, że DoE jest szeroko stosowane w wielu różnych dziedzinach nauki i techniki. Jednakże nie natrafiono na ogólnodostępne opracowania, które opisywałyby zastosowanie DoE w dziedzinie projektowania i badania broni oraz amunicji. Ze względu na dostrzeżone zalety DoE oraz możliwość zastosowania ich w dziedzinie, w której z dużym prawdopodobieństwem nie były wcześniej wykorzystywane, postanowiono je zastosować w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Przystępując do budowy planu eksperymentu, należy zidentyfikować czynniki (zmienne wejściowe), które prawdopodobnie będą miały wpływ na rozpatrywany wynik (wielkość wyjściową). W ten sposób tworzony jest model jakościowy obiektu badań. Chociaż warto ograniczać liczbę tych czynników do minimum, należy uwzględnić wszystkie, które mogą mieć istotny wpływ na badany obiekt. Te zmienne powinny być od siebie niezależne, mierzalne i wyrażone liczbowo z odpowiednią jednostką. Każdy czynnik ma określony, ograniczony zakres wartości, w którym ma być badany. Należy upewnić się, że obiekt działa poprawnie przy każdej kombinacji tych wartości, w tym na ich granicach. Definicja danych niezbędnych do uzyskania wyniku to funkcja obiektu. Z kolei zależność matematyczna, która pozwala obliczyć wartość wyniku na podstawie danych wejściowych, to matematyczny model obiektu. Po wybraniu konkretnych wartości i ich kombinacji, które pozwolą określić wynik, opracowywany jest plan doświadczenia. Jest to optymalny lub bliski optymalnemu wybór punktów pomiarowych, zgodny z ustalonymi kryteriami. Istnieją standardowe narzędzia i plany doświadczeń, które ułatwiają ten proces.

W planowaniu eksperymentu, standardowe schematy badawcze (plany doświadczenia) są przedstawiane za pomocą wielkości unormowanych (bezwymiarowych), a nie rzeczywistych, nieunormowanych (wymiarowych) wartości. Zależność między tymi dwoma typami wartości jest określona wzorem (1.1).

$$X_k = \alpha_d \frac{x_k - (x_{kmin} + x_{kmax})}{x_{kmax} - x_{kmin}} \quad (1.1)$$

gdzie:

- X_k – wartość unormowana k -tego parametru wejściowego,
- k – numer parametru wejściowego, $k = 1, 2, 3, \dots$,
- α_d – ramię gwiazdne planu,
- x_k – wartość nieunormowana k -tego parametru wejściowego.

Plany eksperymentów można podzielić na **statyczne** i **dynamiczne** [96]. **Plany statyczne** są stosowane, gdy badany obiekt pozostaje niezmienny podczas pomiarów, natomiast **plany dynamiczne** są używane, gdy obiekt ulega zmianom w trakcie eksperymentu.

Wśród planów statycznych wyróżnia się trzy główne typy planów:

- **plany optymalizacyjne** – służą do znalezienia najlepszych wartości dla zmiennych wejściowych;
- **plany randomizowane** – pomagają określić, które zmienne wejściowe mają największy wpływ na wynik;
- **plany zdeterminowane** – mają na celu opracowanie matematycznego modelu badanego obiektu.

W kontekście niniejszej rozprawy doktorskiej najistotniejsze są **statyczne plany zdeterminowane**.

W grupie planów zdeterminowanych wyróżnia się plany kompletne oraz plany selekcyjne (jedno- i wieloselekcyjne). Plan kompletny obejmuje wszystkie możliwe kombinacje wartości zmiennych wejściowych. Niestety, często prowadzi to do bardzo dużej liczby permutacji (pomiarów). Z tego powodu, w praktyce najczęściej stosuje się go w uproszczonej formie, znanej jako plan dwuwartościowy, biorąc pod uwagę jedynie skrajne wartości każdego czynnika – minimalną i maksymalną. Tego typu plany są odpowiednie dla obiektów, w których zależność między zmiennymi jest liniowa przynajmniej w badanym zakresie.

W grupie planów zdeterminowanych często używa się również planów trójwartościowych, w których – oprócz minimalnej i maksymalnej wartości czynników – uwzględnia się także wartość środkową. Istnieje też wariant trójwartościowy centralny, który – w porównaniu do planu dwuwartościowego – dodatkowo zawiera jedną konfigurację, w którym wszystkie czynniki przyjmują wartość centralną (tzw. „centrum planu”).

Zazwyczaj dąży się do ograniczenia liczby pomiarów, wybierając tylko te, które są niezbędne do stworzenia poprawnego modelu obiektu badań. W tym celu używa się planów selekcyjnych. W planach monoselekcyjnych analizuje się wpływ tylko jednego parametru na raz, co często dostarcza zbyt mało danych do zbudowania dokładnego modelu. Dlatego bardziej zalecane są plany poliselekcyjne, które dzielą się na:

- frakcyjne;
- ortogonalne;
- rotalne;
- optymalne;
- specjalne.

Plany frakcyjne bazują na uproszczonych planach kompletnych (dwuwartościowych) i polegają na wyborze tylko części wszystkich możliwych kombinacji parametrów wejściowych. Ważne jest, aby liczba wybranych konfiguracji była większa niż liczba współczynników w funkcji, która będzie opisywać badany obiekt.

W przypadku opisanego badanego obiektu za pomocą bardziej złożonej funkcji (na przykład kwadratowej lub wielomianu wyższego stopnia), należy użyć więcej niż dwóch wartości dla każdej zmiennej wejściowej. W tym celu często stosuje się **plany kompozycyjne**, które składają się z następujących elementów:

- wartości średniej (centralnej) dla każdego parametru;
- centrum planu (punktu, w którym wszystkie parametry mają wartość 0);
- punktów gwiazdnych (specjalnych punktów pomiarowych).

Do tej grupy należą m.in. plany ortogonalne, rotalne, a także plany specjalne, takie jak plany Hartleya czy typu Bi.

Planowanie eksperymentu z wykorzystaniem **planów dwuwartościowych** (kompletnych i frakcyjnych) zazwyczaj prowadzi do uzyskania liniowego modelu. Jednak w przypadku badanego obiektu, wpływ niektórych zmiennych wejściowych może być nieliniowy. Ze względu na ograniczenia w sterowaniu wartościami wejściowymi w sposób ciągły, w niniejszej rozprawie doktorskiej zdecydowano się na plany, w których parametry przyjmują wartości unormowane: -1, 0 oraz 1. Optymalnym rozwiązaniem okazał się **plan typu Bi**, który łączy w sobie:

- jądro planu: zbudowane na podstawie planu kompletnego (wymaga wielu pomiarów) lub bardziej efektywnego planu frakcyjnego (z wykorzystaniem tzw. relacji generującej);
- punkty gwiazdne: mające wartości -1, 0, 1.

Podczas budowania planu Bi na podstawie planu kompletnego, liczba potrzebnych pomiarów szybko rośnie wraz z liczbą parametrów. Na przykład, dla liczby próbek $N = 4$ parametry potrzebne są 24 konfiguracje obiektu a dla $N = 5$ – już 42. Z drugiej strony, użycie planu frakcyjnego do konstrukcji planu Bi pozwala na znaczne ograniczenie tej liczby. Przykładowo, plan Bi oparty na planie frakcyjnym 2^{5-1} dla $N = 5$ parametrów wymaga jedynie 26 konfiguracji obiektu. Jest to liczba konfiguracji zbliżona do planu Bi zbudowanego na planie kompletnym dla $N = 4$ parametrów. Stąd nasuwa się wniosek, że dzięki zastosowaniu planu frakcyjnego (opartego na odpowiednim kontraście) można badać większą liczbę parametrów, nie zwiększając znacząco liczby wymaganych pomiarów.

Metody planowania eksperymentu (DoE) pozwalają na zbudowanie modelu jakościowego i wybranie odpowiedniego planu badań, a także dostarczają narzędzi statystycznych, które umożliwiają:

- ocenę błędu losowego;
- analizę wpływu zmiennych wejściowych;
- opracowanie odpowiedniej funkcji, która opisuje badany obiekt;
- weryfikację poprawności tej funkcji;
- ocenę istotności jej poszczególnych współczynników.

Wszystkie te narzędzia zostały szeroko wykorzystane w badaniach opisanych w niniejszej pracy doktorskiej.

Podsumowując, proces przeprowadzania badań eksperymentalnych z użyciem DoE składa się z kilku podstawowych kroków:

- a) **Opisanie obiektu badań:** należy „zrozumieć” obiekt, zidentyfikować problem do rozwiązania i opracować jego model jakościowy. W tym celu należy zdefiniować zmienne wejściowe, ich zakres oraz zmienne wyjściowe.
- b) **Określenie celu badań:** należy jasno sprecyzować, co chce się osiągnąć. Może to być opracowanie modelu matematycznego obiektu, optymalizacja jego działania, albo sprawdzenie, które parametry mają na niego największy wpływ.
- c) **Wybór metody:** należy wybrać odpowiedni plan eksperymentu, określić, ile razy każdy pomiar musi być powtórzony i dobrać narzędzia pomiarowe. Może to wymagać zaprojektowania i zbudowania stanowiska badawczego.

- d) **Przeprowadzenie eksperymentu:** należy wykonać wszystkie zaplanowane pomiary.
- e) **Analiza wyników:** otrzymane rezultaty należy poddać analizie statystycznej, a następnie przeprowadzić analizę merytoryczną, aby zrozumieć, dlaczego zmienne wejściowe wpływają na wyniki w dany sposób.
- f) **Sformułowanie wniosków:** należy opracować wnioski, które powinny obejmować aspekty poznawcze, aplikacyjne i rozwojowe.

1.4. Podsumowanie rozdziału I

Analiza stanu wiedzy w dziedzinie badań broni i amunicji oraz planowania eksperymentu wykazała m.in., że:

- do przeprowadzenia badań przewidzianych w niniejszej pracy doktorskiej, niezbędne będzie zaprojektowanie i wykonanie specjalistycznego stanowiska laboratoryjnego, dedykowanego badaniom, mającym na celu dostarczenie wyników niezbędnych do zwalidowania modelu matematycznego pracy układu z OZPOG;
- sposób badania amunicji zgodnie z tzw. „standardem” CIP wydaje się być najbardziej odpowiedni w odniesieniu do badań zaplanowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej;
- zastosowanie DoE pozwala ograniczyć liczbę badanych konfiguracji obiektu przy zachowaniu zdolności do jego kompletnego opisu. Ma to duże znaczenie w przypadku stosunkowo drogich i czasochłonnych badań broni i amunicji;
- w ogólnodostępnej literaturze przedmiotu brakuje opisów wykorzystania DoE w dziedzinie projektowania i badania broni.

ROZDZIAŁ II

BADANIA AMUNICJI PISTOLETOWEJ ORAZ BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE ODRZUTU ZAMKA PÓLSWOBODNEGO OPÓŹNIANEGO GAZODYNAMICZNIE

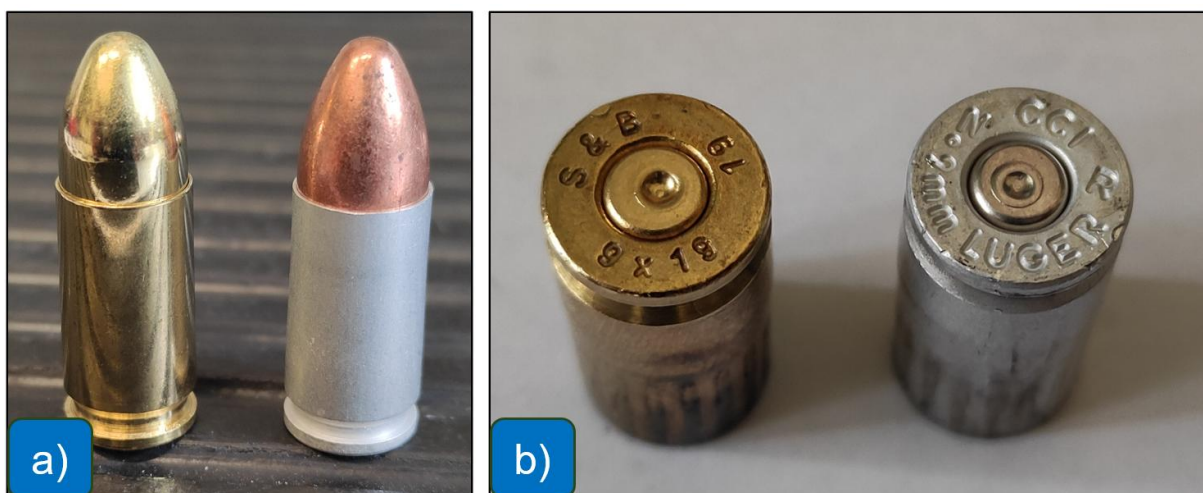
Zgodnie z przyjętą metodyką rozwiązania problemu badawczego, w rozdziale II przeprowadzono badania charakterystyk balistycznych amunicji pistoletowej 9x19 mm Parabellum (PARA)⁹ oraz charakterystyk dynamicznych broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie (OZPOG). Badania te dostarczyły niezbędnych danych potrzebnych do zaprojektowania elementów stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania układu automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG, takich jak przebiegi ciśnienia gazów prochowych występujące w przestrzeni zapociskowej w lufie podczas strzału oraz przebiegi prędkości zespołu odrzucanego. Wyniki zostały również z powodzeniem wykorzystane do wstępnej weryfikacji modelu matematycznego działania układu z OZPOG, który opisano w [2].

2.1. Badania charakterystyk balistycznych amunicji pistoletowej

W celu pozyskania danych potrzebnych do zaprojektowania stanowiska laboratoryjnego (w tym pod względem wytrzymałościowym), przeprowadzono badania charakterystyk balistycznych amunicji PARA. Dotyczyły one głównie pomiaru ciśnienia w lufie podczas strzału w funkcji czasu $p(t)$ oraz prędkości pocisku w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy V_2 . Na podstawie przewidywanych, możliwych różnych charakterystyk balistycznych amunicji (szczególnie ciśnienia maksymalnego w lufie p_{max}), do badań wytypowano naboje (fot. 2.1) wytwarzane przez dwóch producentów:

- BLAZER z pociskiem pełnopłaszczowym (o masie 8,0 g) i łuską aluminiową;
- Sellier&Bellot (S&B) z pociskiem pełnopłaszczowym (o masie 7,5 g) i łuską mosiężną.

⁹ Nabój 9x19 mm Parabellum w specjalistycznej literaturze przedmiotu występuje pod różnymi nazwami: 9 mm PARA, 9 mm Luger, 9 mm NATO. W pracy doktorskiej będzie stosowana nazwa skrócona – PARA z dołączoną nazwą producenta.



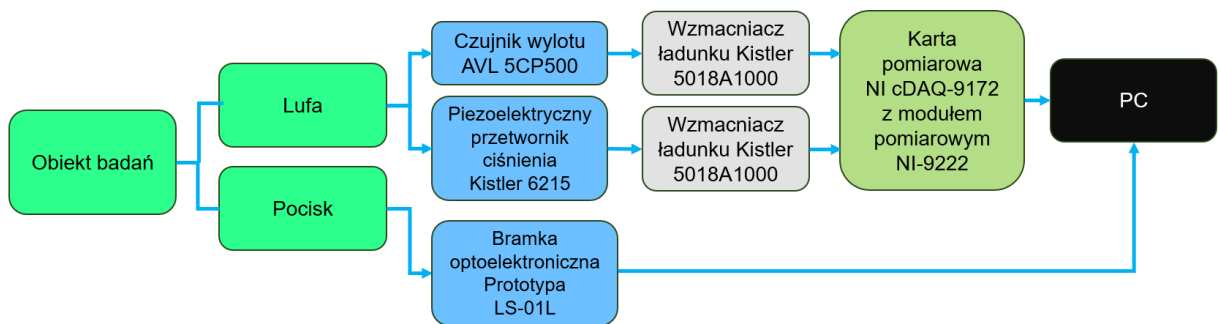
Fot. 2.1. Amunicja wytypowana do badań:
a) nabój PARA S&B (z lewej), nabój PARA BLAZER (z prawej); b) łuska naboju PARA S&B (z lewej), łuska naboju PARA BLAZER (z prawej)

Wykaz aparatury badawczej i materiałów wykorzystanych w badaniach przedstawiono w tab. 2.1, natomiast podstawowe parametry aparatury pomiarowej – w załączniku nr 1 do niniejszej pracy.

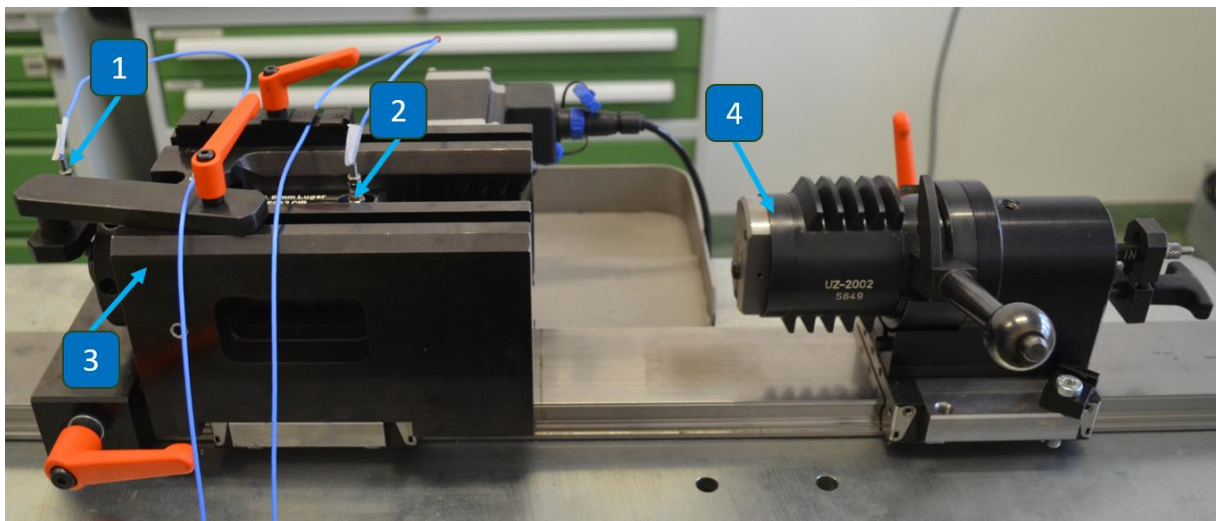
Tab.2.1. Wykaz aparatury badawczej i materiałów wykorzystanych w badaniach charakterystyk balistycznych amunicji PARA

Lp.	Wyszczególnienie	Liczba sztuk
1.	Podstawa strzelecka STZA 13	1
2.	Uniwersalny zamek balistyczny UZ-2002	1
3.	Ciśnieniowa lufa balistyczna 9 mm PARA do wykonywania pomiarów zgodnych ze standardem CIP	1
4.	Przetwornik ciśnienia Kistler 6215	1
5.	Czujnik wylotu AVL 5CP500	1
6.	Wzmacniacz ładunku Kistler 5018A1000	2
7.	Karta pomiarowa NI cDAQ-9178 z modułem pomiarowym NI-9222	1
8.	Kulochwył	1
9.	Bramka optoelektroniczna Prototypa LS-01L	1
10.	Komputer klasy PC z oprogramowaniem DAQExpress	1
11.	Nabój PARA S&B z pociskiem o masie 7,5 g	10
12.	Nabój PARA BLAZER z pociskiem o masie 8,0 g	10

Schemat układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach przedstawiono na rys. 2.1, a zestawione stanowisko laboratoryjne do pomiaru $p(t)$ w łusce – na fot. 2.2.

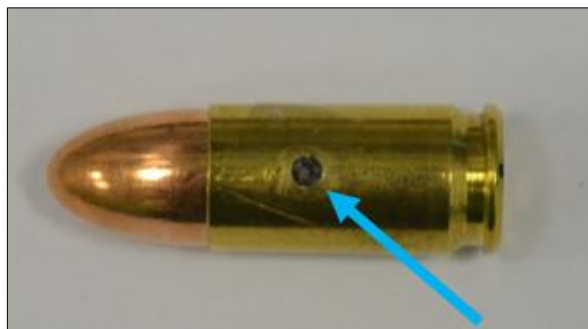


Rys. 2.1. Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyk balistycznych amunicji PARA



Fot. 2.2. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru $p(t)$ w łusce:
 1 – czujnik wylotu pocisku z lufy, 2 – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia,
 3 – lufa balistyczna zamontowana w nasadzie zamkowej, 4 – uniwersalny zamek balistyczny

Na podstawie analizy opisanej w podrozdziale 1.2.1 zdecydowano na przeprowadzenie badań zgodnie ze standardem CIP. Stosowanie standardu CIP wiąże się z odpowiednim przygotowaniem amunicji do badań, polegającym na wywierceniu w ścianie łuski otworu, który jest usytuowany w ściśle określonej odległości mierzonej od płasku wlotowego lufy (fot. 2.3).

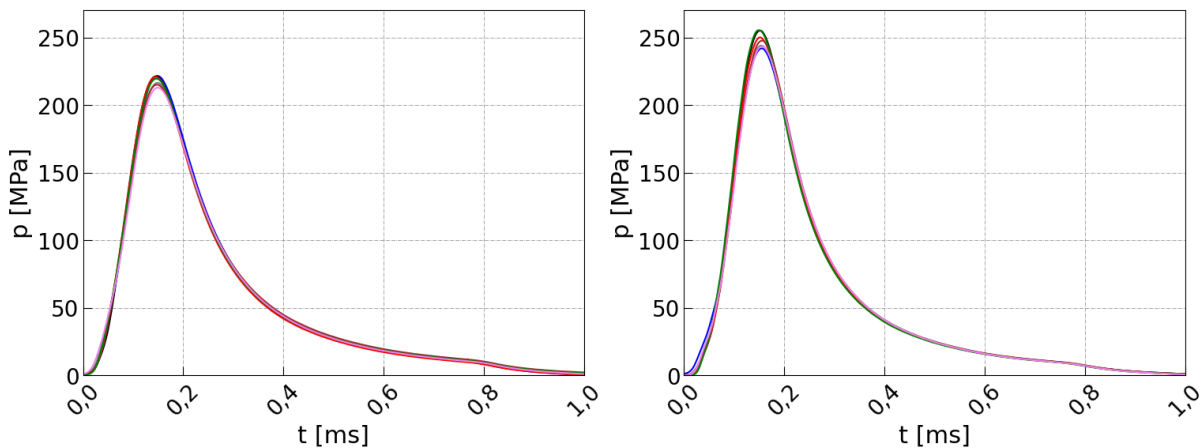


Fot. 2.3. Nabój PARA przygotowany do badań (strzałką zaznaczono otwór wykonany w ścianie łuski)

Amunicję przygotowano do badań, wykorzystując specjalistyczne uchwyty do wiercenia otworów, które zapewniają powtarzalność położenia otworu w ścianie łuski naboju oraz bezpieczeństwo, w przypadku ewentualnego zapłonu ładunku miotającego podczas wiercenia. Zastosowanie tego typu uchwytów pozwala na zachowanie współosiowości otworu wykonanego w ścianie łuski i otworu gazowego w lufie, prowadzącego do czujnika ciśnienia.

Poza rejestracją $p(t)$ określano również prędkość pocisku na torze lotu V_2 . W tym celu wykorzystano bramkę optoelektroniczną, której środek bazy pomiarowej znajdował się w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy.

Podczas badań przeprowadzono po 7 prób dla obu typów amunicji. Uzyskane przebiegi $p(t)$ przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji: PARA BLAZER (z lewej), PARA S&B (z prawej)

Zestawienie uzyskanych p_{max} w łusce oraz V_2 dla każdej próby przedstawiono w tab. 2.2. Jako miarę niepewności wartości średniej przyjęto odchylenie standardowe próbki $S(z)$. Wynikało to z faktu, że dla 7 powtórzeń pomiarów, błąd graniczny wartości średniej dla poziomu ufności 0,95 ma wartość zbliżoną do odchylenia standardowego.

Tab. 2.2. Zestawienie zmierzonych p_{max} w łusce oraz V_2 ; \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Wyszczególnienie	p_{max} [MPa]		V_2 [m/s]	
	PARA BLAZER	PARA S&B	PARA BLAZER	PARA S&B
1	216,48	243,98	369,9	395,3
2	221,58	241,96	373,0	394,9
3	221,31	255,09	370,2	396,5

Tab. 2.2. c.d. Zestawienie zmierzonych p_{max} w łusce oraz V_2 ; \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Wyszczególnienie	p_{max} [MPa]		V_2 [m/s]	
	PARA BLAZER	PARA S&B	PARA BLAZER	PARA S&B
4	220,83	250,03	368,9	397,7
5	215,07	247,68	369,7	394,5
6	219,51	255,40	371,0	398,4
7	212,92	243,20	366,3	395,3
\bar{z}	218,24	248,19	369,9	396,1
$S(z)$	3,42	5,55	2,0	1,5

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że p_{max} w łusce naboju podczas strzału wynosiło $218,24 \pm 3,42$ MPa – dla amunicji firmy BLAZER oraz $248,19 \pm 5,55$ MPa – dla amunicji firmy S&B. Różnica p_{max} w łusce pomiędzy amunicją różnych producentów wyniosła około 12%. Z kolei prędkość V_2 różniła się o około 7% i wynosiła $369,9 \pm 2,0$ m/s – dla amunicji firmy BLAZER i $396,1 \pm 1,5$ m/s – dla amunicji S&B. Powyższe wyniki świadczą o istotnych różnicach p_{max} uzyskanych dla obu typów amunicji. Podczas projektowania stanowiska laboratoryjnego przyjęto wyższą wartość p_{max} , aby zapewnić jego bezpieczne i bezawaryjne działanie przy wykorzystaniu amunicji różnych producentów.

Badania wykazały, że amunicja obu producentów charakteryzowała się dużą powtarzalnością uzyskiwanych wyników zarówno w obszarze p_{max} w łusce, jak i V_2 . Powinno to skutkować znacznym ograniczeniem błędów pomiarowych podczas badań na stanowisku laboratoryjnym, których źródłem jest sama amunicja. Ponadto, badania dostarczyły rzetelnych danych niezbędnych do zaprojektowania stanowiska laboratoryjnego oraz wstępnej weryfikacji modelu matematycznego pracy układu z OZPOG przeprowadzonej w ramach [2].

2.2. Badania charakterystyk dynamicznych broni działającej na zasadzie OZPOG

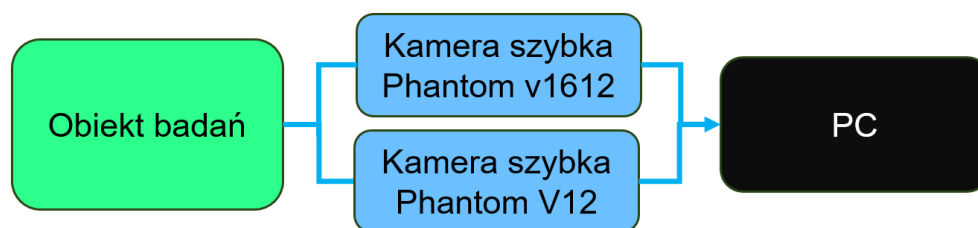
Jednym z głównych parametrów charakteryzujących pracę broni działającej na zasadzie OZPOG jest prędkość ruchu zespołu odrzucanego v_{zo} . W celu pozyskania informacji na temat wartości v_{zo} , przeprowadzono badania charakterystyk dynamicznych broni. Do badań wytypowano reprezentatywną broń działającą na tej

zasadzie, tj. 9 mm pistolet HK P7 oraz amunicję PARA dwóch producentów, którą poddano badaniom w podrozdziale 2.1.

Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów wykorzystanych w badaniach charakterystyk dynamicznych pistoletu HK P7 przedstawiono w tab. 2.3, natomiast schemat układu pomiarowego do przeprowadzenia tych badań – na rys. 2.3. Podstawowe parametry aparatury pomiarowej przedstawiono w **załączniku nr 1** do niniejszej pracy.

Tab. 2.3. Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów wykorzystanych w badaniach charakterystyk dynamicznych pistoletu HK P7

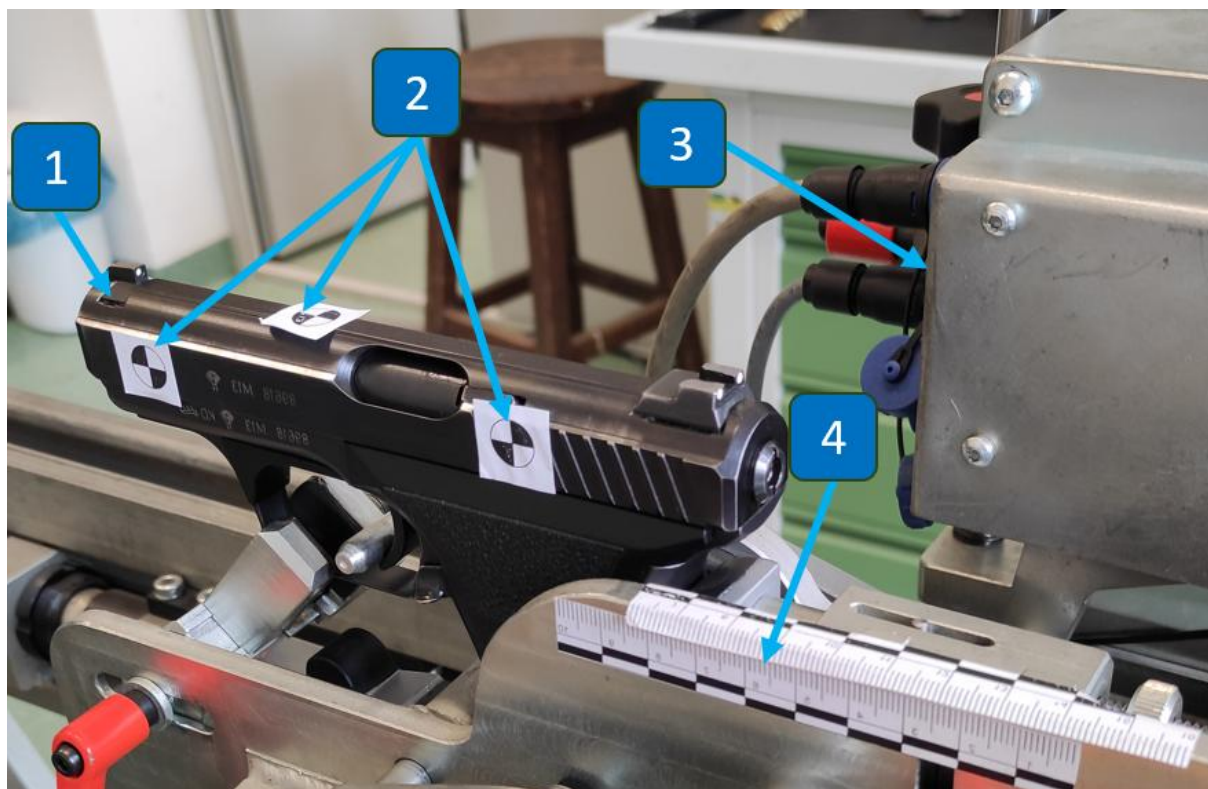
Lp.	Wyszczególnienie	Liczba sztuk
1.	Podstawa strzelecka STZA 13	1
2.	Uniwersalny uchwyt pistoletowy	1
3.	Kamera szybka Phantom v1612	1
4.	Kamera szybka Phantom V12	1
5.	Kulochwyt	1
6.	Komputer klasy PC z oprogramowaniem Phantom Camera Control	2
7.	Pistolet HK P7	1
8.	Elektrospust	1
9.	Nabój PARA S&B z pociskiem o masie 7,5 g	10
10.	Nabój PARA BLAZER z pociskiem o masie 8,0 g	10



Rys. 2.3. Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyk dynamicznych pistoletu HK P7

Do badań przemieszczenia zespołu odrzucanego (ZO) pistoletu wykorzystano dwie kamery do zdjęć szybkich. Pierwszą kamerę umieszczono w taki sposób, aby oś optyczna obiektywu znajdowała się prostopadle do linii strzału i płaszczyzny bocznej pistoletu. Natomiast drugą kamerę usytuowano nad obiektem badań w taki sposób, aby oś optyczna obiektywu znajdowała się prostopadle do linii strzału i górnej płaszczyzny zamka pistoletu. Obie kamery ustawiono w sposób minimalizujący wpływ błędu paralaksy na pomiar. Mimo, że zastosowanie jednej kamery szybkiej byłoby

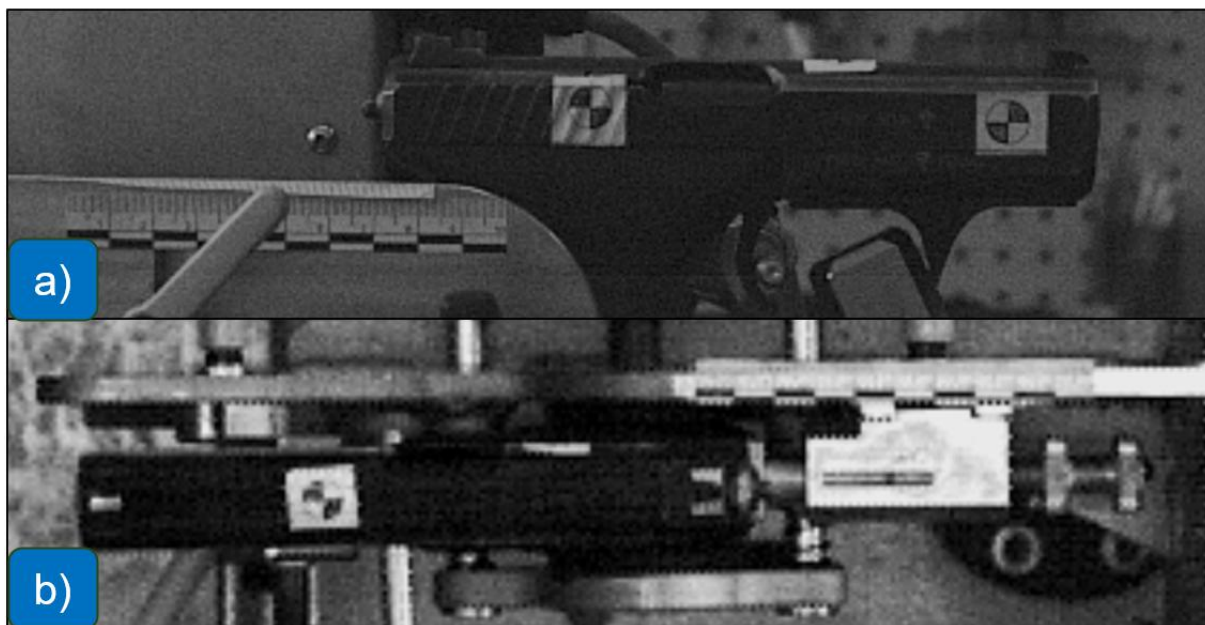
wystarczające do przeprowadzenia badań, to postanowiono sprawdzić również wpływ położenia kamer na wyniki badań. Podczas wcześniejszych badań pistoletów prowadzonych w Zakładzie Broni i Amunicji ITU WML WAT zaobserwowano bowiem, że broń zamontowana w uniwersalnym uchwycie pistoletowym (fot. 2.4) obraca się względem punktu podparcia podczas strzału wskutek działania podrzutu broni, tj. pionowej składowej siły odrzutu.



Fot. 2.4. Pistolet HK P7 zamontowany w uniwersalnym uchwycie pistoletowym:
1 – pistolet, 2 – znaczniki kontrastowe, 3 – elektropust, 4 – wzornik długości

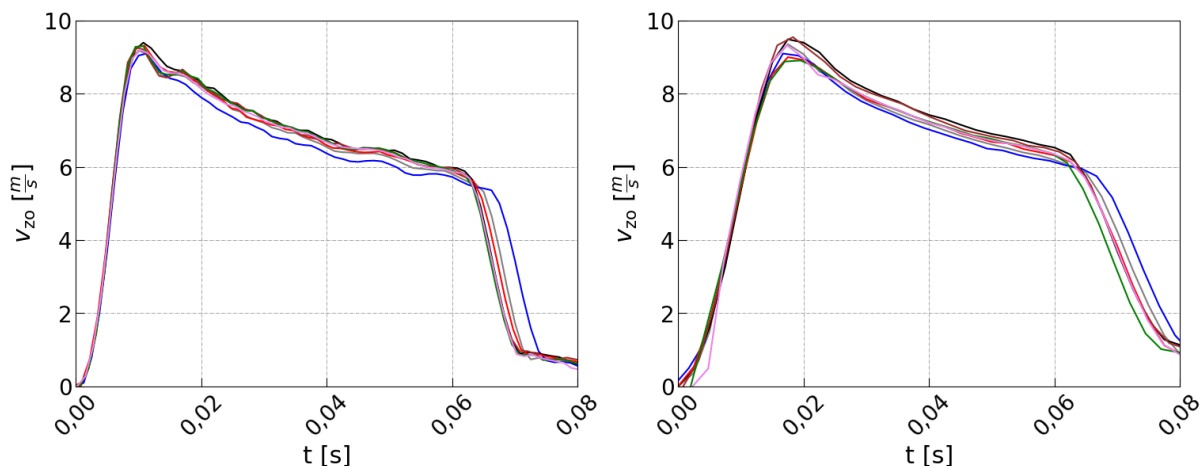
Kamera szybka rejestrująca z góry jest najbardziej narażona na powstawanie błędu pomiaru spowodowanego podrzutem broni, ponieważ wylot lufy obraca się w kierunku kamery, pozornie skracając odległość, jaką pokonuje ZO podczas odrzutu. Należy również zauważyć, że podparcie tylnej części broni w uchwycie strzeleckim odbywa się za pomocą elementu wykonanego z tworzywa sztucznego. Podczas strzału podparcie to, pochłaniając część energii odrzutu, ulega odkształceniu. Powoduje to wydłużenie drogi odrzutu ZO broni dla kamery. Podczas obróbki filmów z kamer szybkich możliwe jest wykorzystanie dynamicznych układów współrzędnych, które mogą być związane z ruchomymi elementami broni. Dynamiczny układ współrzędnych porusza się liniowo i kątowno z obiektem badań, niwelując część

możliwych do powstania błędów pomiarowych. Tego typu działanie nie może jednak wyeliminować błędu wynikającego z podrzutu broni w przypadku pomiaru kamerą umieszczoną nad bronią. Przykładowe zdjęcia z zarejestrowanych filmów wykonanych za pomocą kamer szybkich przedstawiono na fot. 2.5.

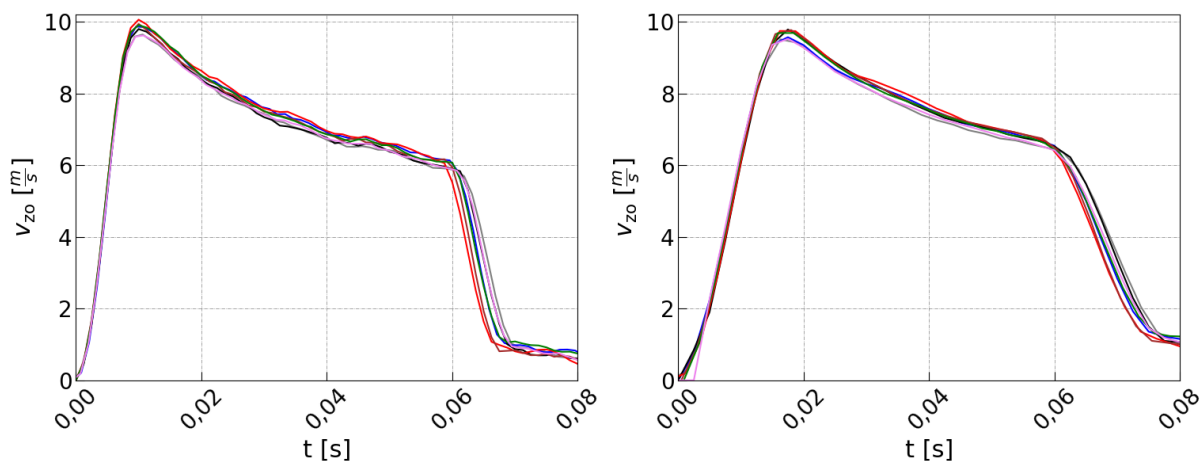


Fot. 2.5. Przykładowe zdjęcia z zarejestrowanych filmów wykonanych za pomocą kamer szybkich: a) kamera rejestrująca z boku, b) kamera rejestrująca z góry

Obróbkę zarejestrowanych filmów wykonano za pomocą oprogramowania TEMA, które śledzi znaczniki kontrastowe i określa ich przemieszczenie w czasie. Znaczniki umieszczono na zamku pistoletu HK P7, który jest elementem ruchomym podczas strzału. Kalibrację długości przeprowadzono z wykorzystaniem wzorników długości umieszczonych na widocznych w kadrze elementach nieruchomych. W przypadku obróbki zdjęć z obu kamer wykorzystano dynamiczne układy współrzędnych. Różniczkowanie przebiegów przemieszczenia znaczników w czasie pozwala na uzyskanie prędkości (oprogramowanie TEMA wykonuje różniczkowanie na podstawie wbudowanych algorytmów). Prędkość ta była tożsama z prędkością zespołu odrzucanego broni. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego $v_{zo}(t)$ 9 mm pistoletu HK P7 dla dwóch rodzajów amunicji (PARA BLAZER i PARA S&B), przy wykorzystaniu dwóch kamer szybkich rejestrujących z boku i z góry, przedstawiono na rys. 2.4 i 2.5.



Rys. 2.4. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t pistoletu HK P7 uzyskane dla amunicji PARA BLAZER, zarejestrowane kamerą: z boku (z lewej), z góry (z prawej)



Rys. 2.5. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t pistoletu HK P7 uzyskane dla amunicji PARA S&B, zarejestrowane kamerą: z boku (z lewej), z góry (z prawej)

Zestawienie maksymalnych prędkości zespołu odrzucanego v_{zomax} dla pistoletu HK P7 dla dwóch rodzajów amunicji (PARA BLAZER i PARA S&B) przedstawiono w tab. 2.4.

Tab. 2.4. Zestawienie v_{zomax} dla pistoletu HK P7 dla dwóch rodzajów amunicji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbek

Wyszczególnienie	v_{zomax} [m/s]			
	PARA BLAZER		PARA S&B	
	Kamera z boku	Kamera z góry	Kamera z boku	Kamera z góry
1	9,18	9,11	9,64	9,50
2	9,10	9,09	9,86	9,56

Tab. 2.4. c.d. Zestawienie v_{zomax} dla pistoletu HK P7 dla dwóch rodzajów amunicji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Wyszczególnienie	v_{zomax} [m/s]			
	PARA BLAZER		PARA S&B	
	Kamera z boku	Kamera z góry	Kamera z boku	Kamera z góry
3	9,39	9,56	9,79	9,78
4	9,31	9,92	10,05	9,74
5	9,26	9,26	9,94	9,76
6	9,30	9,25	9,90	9,68
7	9,20	8,89	9,61	9,52
\bar{z}	9,25	9,30	9,83	9,65
$S(z)$	0,10	0,34	0,16	0,12

Bazując na wynikach badań (tab. 2.4) można stwierdzić, że – zgodnie z przewidywaniami – zastosowanie amunicji firmy S&B, charakteryzującej się wyższym p_{max} (od amunicji firmy BLAZER), skutkowało uzyskaniem wyższej o około 6% v_{zomax} broni podczas strzału ($9,83 \pm 0,16$ m/s – dla kamery rejestrującej z boku oraz $9,65 \pm 0,12$ m/s – dla kamery rejestrującej z góry) względem wyników uzyskanych dla amunicji firmy BLAZER, dla której v_{zomax} broni wyniosły $9,25 \pm 0,10$ m/s – dla kamery rejestrującej z boku oraz $9,30 \pm 0,30$ m/s – dla kamery rejestrującej z góry. Wyniki badań charakteryzowały się dużą powtarzalnością, dlatego zostały również wykorzystane do wstępnej weryfikacji modelu matematycznego pracy układu z OZPOG przedstawionej w [2].

W celu sprawdzenia, czy pomiary wykonane za pomocą kamer umieszczonych w różnych miejscach stanowiska laboratoryjnego dają tożsame wyniki przeprowadzono test statystyczny. W związku z tym, że liczba pomiarów była niższa od 30, do przeprowadzenia testu istotności wybrano rozkład t-Studenta [96].

Zakłada się, że próbki należą do dwóch populacji. Nie znając dokładnych wartości średnich w populacji oraz wartości odchylenia standardowego, szacuje się te wartości przez średnie z próbek i ich odchylenia standardowe (\bar{z}_1, S_1) , (\bar{z}_2, S_2) . Przyjmuje się hipotezę zerową mówiącą, że \bar{z}_1 i \bar{z}_2 są równe w sensie statystycznym. Test istotności polega na określeniu krytycznych przedziałów wartości statystyki, w których można odrzucić hipotezę zerową z prawdopodobieństwem (poziomem ufności) równym $1-\alpha$. Prawdopodobieństwo, że hipoteza zerowa jest prawdziwa jest równe poziomowi istotności α [97].

Statystyka T ma rozkład t-Studenta z $n_1 + n_2 - 2$ stopniami swobody, gdzie n oznacza liczbę próbek. W ramach analizy założono poziom istotności równy $\alpha = 0,05$. Dla takiego poziomu istotności, za pomocą funkcji ROZKŁ.T.ODWR.DS($\alpha; n_1+n_2-2$) arkusza Excel, wyznaczono zakres krytyczny (T_{kr}). T_{kr} dla rozkładu t-Studenta w tym przypadku zawiera się w przedziale $(-\infty, -2,18) \cap (2,18, +\infty)$. Jeżeli wartość T należy do tego przedziału można odrzucić hipotezę zerową. Wartość T obliczono ze wzoru (2.1):

$$T = \frac{\bar{z}_1 - \bar{z}_2}{\sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2.1)$$

W pierwszej kolejności sformułowano hipotezę zerową: wartości średnie są sobie równe, czyli umiejscowienie kamery nie wpływa w sposób istotny na wynik pomiaru. Następnie obliczono parametr T , który wyniósł $T = -0,34$ dla amunicji PARA BLAZER oraz $T = 2,19$ dla amunicji PARA S&B. Sprawdzając, czy wartość parametrów T leży w przedziale krytycznym można stwierdzić, że dla amunicji PARA BLAZER hipoteza zerowa jest prawdziwa, co oznacza, że umiejscowienie kamery nie wpływa w sposób istotny na wyniki pomiarów. Z kolei dla amunicji PARA S&B hipoteza zerowa nie jest prawdziwa, co oznacza, że nie można stwierdzić, iż umiejscowienie kamery nie wpływa w sposób istotny na wyniki pomiarów.

Na podstawie przeprowadzonych testów statystycznych dla dwóch rodzajów amunicji nie można jednoznacznie stwierdzić, że umiejscowienie kamery nie ma wpływu na wyniki pomiarów. Zalecane byłoby wykonanie dodatkowych badań ukierunkowanych na sprawdzenie wpływu sposobu ich prowadzenia na wynik pomiarów, co skutkowałoby opracowaniem sprawdzonej metodyki prowadzenia tego typu badań w przyszłości.

2.3. Podsumowanie rozdziału II

Na podstawie zrealizowanego etapu II należy stwierdzić, że:

- wyniki pomiarów p_{max} w łusce i V_2 dla obu typów amunicji charakteryzowały się dużą powtarzalnością. Powinno to skutkować ograniczeniem błędów pomiarowych podczas badań na stanowisku laboratoryjnym, których źródłem jest amunicja;

- zastosowanie amunicji charakteryzującej się wyższym p_{max} w łusce skutkowało uzyskaniem wyższej wartości v_{zomax} w broni działającej na zasadzie OZPOG;
- przeprowadzone badania dostarczyły rzetelnych danych o p_{max} w łusce, V_2 oraz v_{zomax} , które były niezbędne do zaprojektowania stanowiska laboratoryjnego;
- uzyskane wyniki posłużyły do wstępnej weryfikacji modelu matematycznego działania układu z OZPOG, którą opisano w [2];
- na podstawie przeprowadzonych badań, nie można jednoznacznie stwierdzić czy umiejscowienie kamery ma wpływ na wyniki pomiarów.

ROZDZIAŁ III

MODYFIKACJA UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE ODRZUTU ZAMKA PÓLSWOBODNEGO OPÓŹNIANEGO GAZODYNAMICZNIE

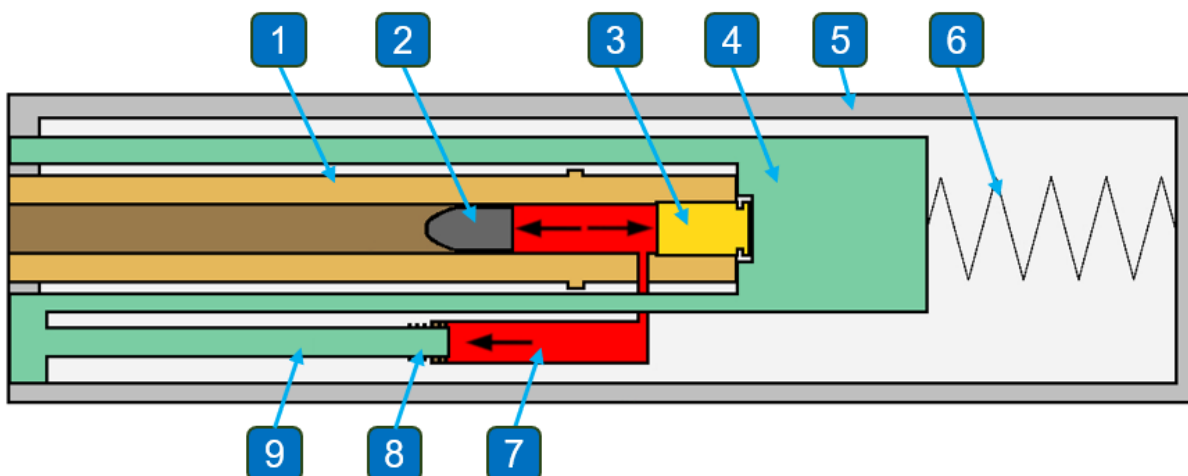
W klasycznym układzie z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, zastosowanym w m.in. w niemieckich 9 mm pistoletach HK P7 i Walther CCP, gazy prochowe odprowadzane przez otwór boczny w lufie działają na czoło tłoka gazowego, opóźniając otwarcie zamka podczas strzału. Tłok gazowy poprzez tłoczysko jest połączony w sposób trwały z zamkiem. Taki układ konstrukcyjny ogranicza możliwość jego praktycznego zastosowania (spełniającego wymagania technologiczne, ekonomiczne, ergonomiczne itp.) jedynie do broni, w której zamek jest elementem „nakładanym” na lufę i „obejmującym” ją niemal na całej jej długości. Jest to układ konstrukcyjny typowy dla pistoletów, takich jak 9 mm pistolet HK SFP9, który przedstawiono na fot. 3.1. W nowoczesnych pistoletach maszynowych oraz karabinkach, które mają układ konstrukcyjny zbliżony do subkarabinka systemu MSBS (przedstawionego na fot. 3.2), rozwiązania tego typu nie występują. Schemat klasycznego układu z OZPOG został przedstawiony na rys. 3.1.



Fot. 3.1. 9 mm pistolet HK SFP9



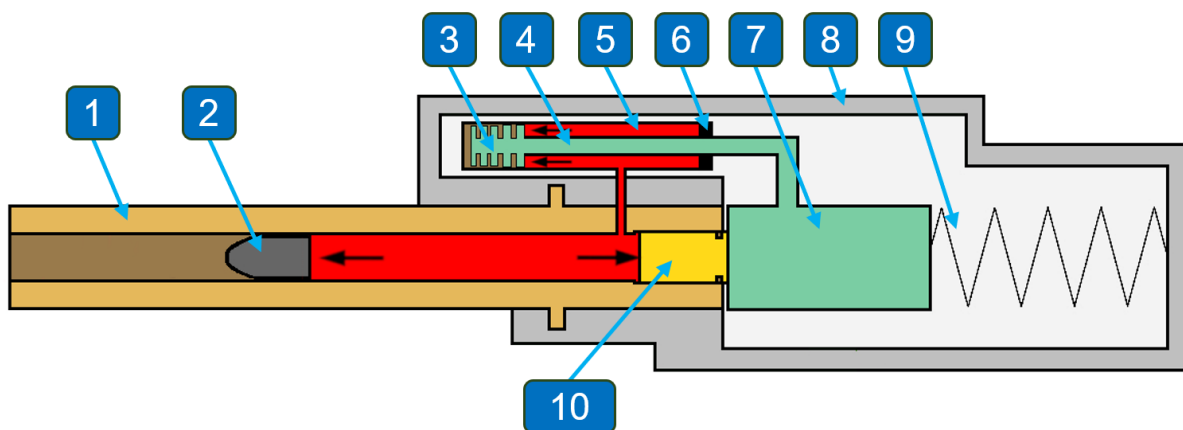
Fot. 3.2. 5,56 mm subkarabinek MSBS GROT



Rys. 3.1. Schemat klasycznego układu z OZPOG: 1 – lufa, 2 – pocisk, 3 – łuska, 4 – zamek, 5 – komora zamkowa, 6 – sprężyna powrotna, 7 – komora gazowa, 8 – tłok gazowy, 9 – tłoczysko

Dostrzegając możliwość i celowość rozszerzenia obszaru stosowania w broni strzeleckiej układu z OZPOG, opracowano jego oryginalną modyfikację konstrukcyjną, która potencjalnie może być zastosowana w każdym rodzaju automatycznej broni strzeleckiej, a zwłaszcza w pistoletach maszynowych i karabinkach. Schemat układu z OZPOG po modyfikacjach konstrukcyjnych przedstawiono na rys. 3.2. Główna różnica w układzie konstrukcyjnym, w stosunku do klasycznego rozwiązania (rys. 3.1), polega na zmianie miejsca oddziaływania gazów prochowych na tłok gazowy, co pozwala na inną konfigurację zespołów i podzespołów broni. W układzie po modyfikacji, gazy prochowe odprowadzone przez otwór boczny w lufie działają na tylną powierzchnię tłoka gazowego (od strony połączenia z tłoczyskiem), będącą pierścieniem o powierzchni wynikającej z różnicy powierzchni czołowej tłoka

gazowego i powierzchni przekroju poprzecznego tłoczyska. Dodatkowym, niezbędnym elementem, który musi występować w takim układzie jest uszczelnienie tłoczyska, które uszczelnia komorę gazową, zapewniając możliwość ruchu tłoka z jak najmniejszymi oporami.



Rys. 3.2. Schemat układu z OZPOG po modyfikacjach konstrukcyjnych: 1 – lufa, 2 – pocisk, 3 – tłok gazowy, 4 – tłoczysko, 5 – komora gazowa, 6 – uszczelnienie komory gazowej, 7 – zamek, 8 – komora zamkowa, 9 – sprężyna powrotna, 10 – łuska

Zaproponowana modyfikacja układu konstrukcyjnego z OZPOG nie powoduje zwiększenia stopnia skomplikowania układu gazowego (jest on zbliżony do najpowszechniej wykorzystywanego obecnie w karabinkach układu z odprowadzeniem części gazów prochowych – OGP), a ma – w porównaniu do niego – dwie ważne zalety. Pierwszą z nich jest możliwość zastosowania amunicji generującej mniej gazów prochowych. Specyfika automatyki broni z OGP ogranicza możliwość jej zastosowania w broni zasilanej amunicją pistoletową¹⁰. Po drugie, w układzie z OZPOG nie występuje ryglowanie zespołu odrzucanego z lufą (które występuje w układzie z OGP). Dlatego też nie ma potrzeby wykonywania opór ryglowych w lufie oraz rygli na zamku (najpopularniejsze rozwiązanie), co upraszcza i obniża koszty procesu produkcji broni oraz może wpływać pozytywnie na jej trwałość w toku eksploatacji.

Jednakże, zaproponowana modyfikacja nie jest pozbawiona wad, bowiem uszczelnienie komory gazowej jest tym elementem, który może wymagać wymiany w toku eksploatacji. Częstotliwość wymiany uszczelnienia będzie zależała od jego

¹⁰ Występują pojedyncze rozwiązania broni z układem OGP zasilane amunicją pistoletową, jednak nie zyskały one dużej popularności.

trwałości i efektywności. Dodatkowo, tak skonstruowany układ gazowy może wymusić zastosowanie bardziej skomplikowanego (w porównaniu do układu z OGP) sposobu rozkładania broni.

Podsumowując, zaproponowana modyfikacja konstrukcyjna układu z OZPOG może rozszerzyć możliwość jego zastosowania do każdego rodzaju automatycznej broni strzeleckiej. Co więcej, zalety, którymi charakteryzuje się zmodyfikowany układ z OZPOG, może uczynić go konkurencyjnym dla najczęściej obecnie wykorzystywanego w karabinkach układu z OGP.

ROZDZIAŁ IV

CHARAKTERYSTYKA I TESTOWANIE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO DOŚWIADCZALNEGO BADANIA UKŁADU AUTOMATYKI BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE OZPOG

W etapie IV pracy doktorskiej opracowano oryginalne stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG, które składa się z części mechanicznej oraz części pomiarowej. Stanowisko to jest chronione patentem polskim nr PL 247883 [98]¹¹. Podczas projektowania stanowiska wykorzystano wnioski z badań doświadczalnych zawartych w rozdziale II oraz wnioski z analizy stanu techniki i badań symulacyjnych przedstawionych w [2]. W stanowisku wykorzystano zmodyfikowany układ konstrukcyjny z OZPOG opisany w rozdziale III.

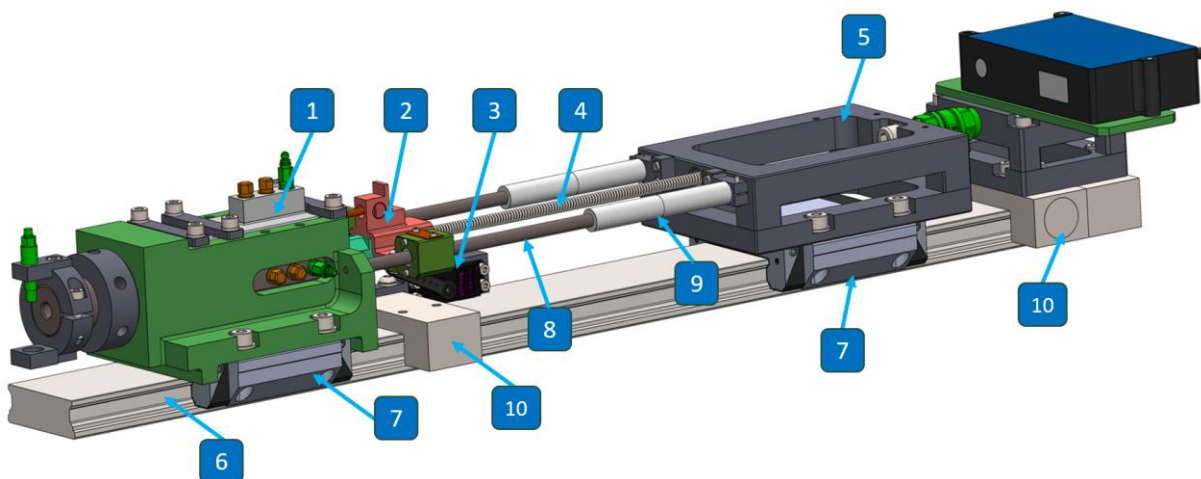
4.1. Charakterystyka części mechanicznej stanowiska laboratoryjnego

Projekt koncepcyjny stanowiska laboratoryjnego do badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG w postaci modelu bryłowego opracowano w środowisku SolidWorks. Następnie projekt zweryfikowano analitycznie z wykorzystaniem opracowanego w [2] modelu matematycznego. Zweryfikowany projekt koncepcyjny stanowiska był podstawą do opracowania jego dokumentacji konstrukcyjnej¹², niezbędnej do wykonania stanowiska.

Zaprojektowane stanowisko laboratoryjne (przedstawione na rys. 4.1) składa się z sześciu głównych zespołów: nasady z lufą i komorą gazową, suwadła z zamkiem, mechanizmu spustowego, zespołu urządzenia powrotnego, zespołu mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia oraz podstawy, zawierającej szynę uniwersalną, podpory ruchome i podpory stałe. Ponadto, w skład stanowiska wchodzi dwie prowadnice, na których umieszczono ograniczniki odrzutu.

¹¹ Patent PL 247883 na wynalazek pt. „Stanowisko do badania odrzutu zamka” z dnia 20.06.2025 r. Udział autora niniejszej rozprawy w patencie – 75%.

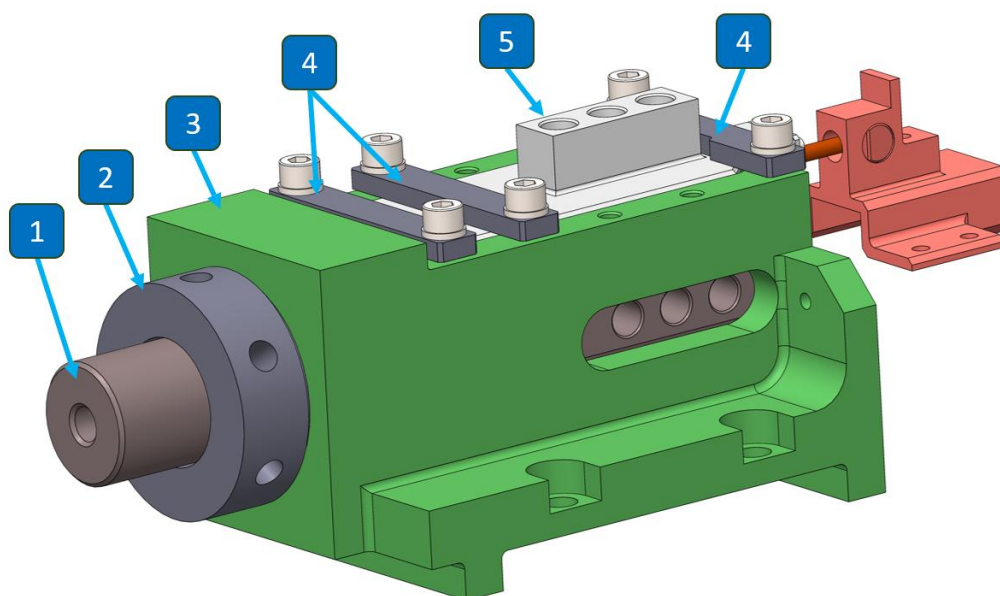
¹² Dokumentacja konstrukcyjna pt. „Dokumentacja konstrukcyjna stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka”, opracowana zgodnie z wymaganiami zawartymi w Decyzji nr 349/MON [99], jest dostępna w Zakładzie Broni i Amunicji ITU WML WAT.



Rys. 4.1. Stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG: 1 – zespół nasady z lufą i komorą gazową, 2 – zespół suwadła z zamkiem, 3 – zespół mechanizmu spustowego, 4 – zespół urządzenia powrotnego, 5 – zespół mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia, 6 – szyna uniwersalna, 7 – ruchome podpory, 8 – prowadnice, 9 – ograniczniki odrzutu, 10 – podpory stałe

4.1.1. Zespół nasady z lufą i komorą gazową

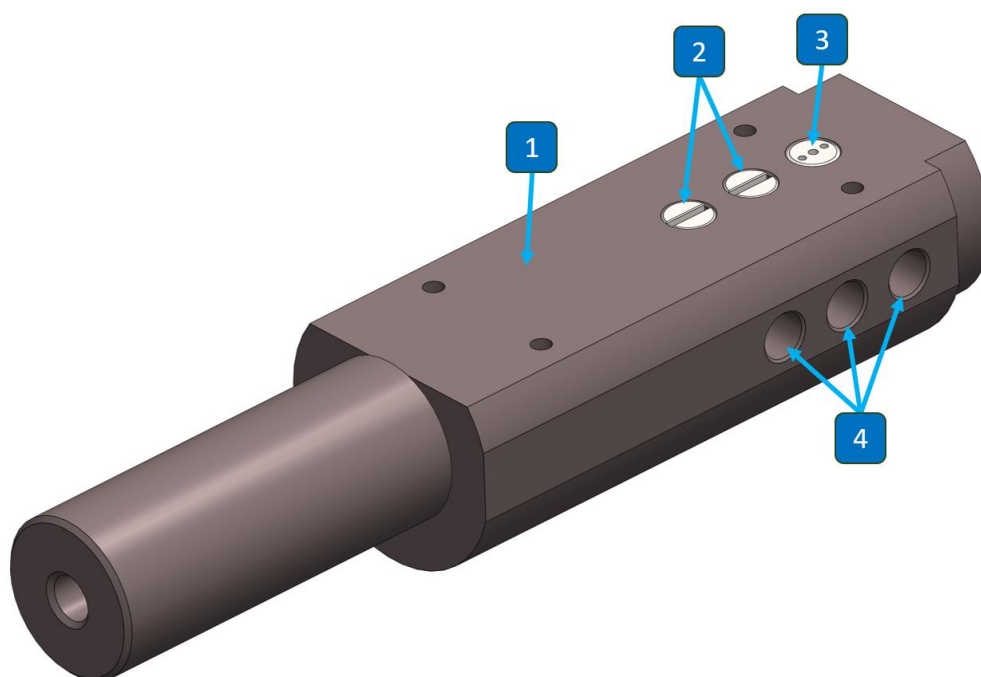
Zespół nasady z lufą i komorą gazową (rys. 4.2) składa się z: lufy, nakrętki lufy, nasady, płytek montażowych oraz zespołu komory gazowej z tłokiem.



Rys. 4.2. Zespół nasady z lufą i komorą gazową: 1 – lufa, 2 – nakrętka lufy, 3 – nasada, 4 – płytki montażowe, 5 – zespół komory gazowej z tłokiem

Lufa (rys. 4.3) jest zasadniczym elementem układu miotającego, służącym do nadania pociskowi kierunku oraz prędkości postępowej i obrotowej. Lufę wykorzystaną w stanowisku laboratoryjnym zaprojektowano specjalnie do badania zjawiska

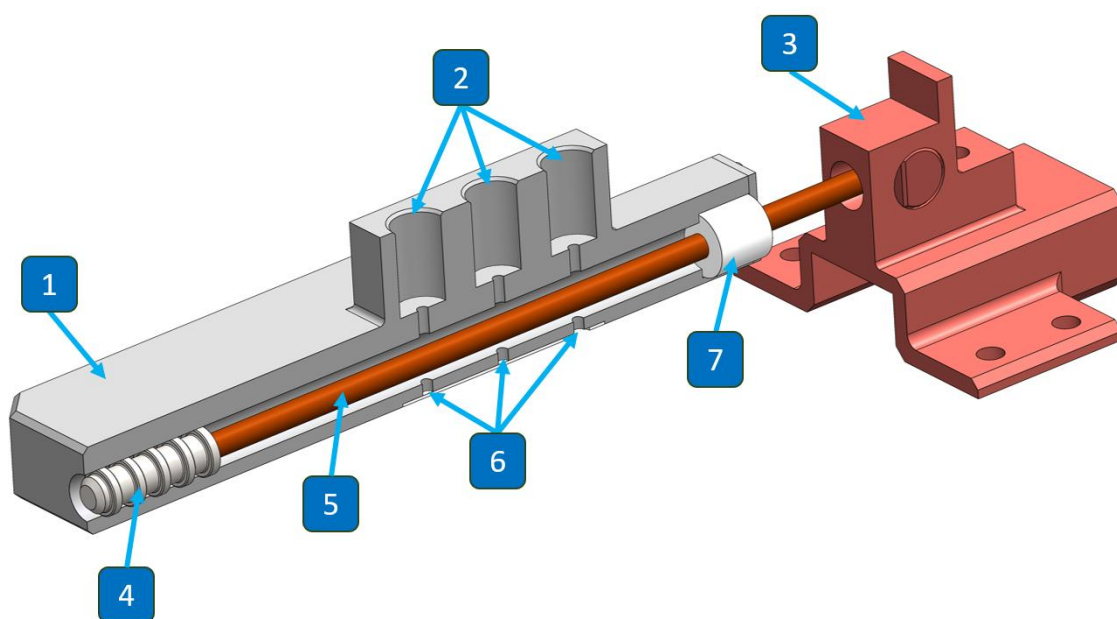
opóźnienia gazowego. Górna, płaska powierzchnia lufy jest przystosowana do połączenia z komorą gazową. Powierzchnia ta była bazą do wykonania trzech gniazd przeznaczonych do montażu wkrętek (zaślepiających lub wyposażonych w otwory gazowe). Oś pierwszego gniazda znajduje się w odległości 21,5 mm od płasku wlotowego lufy, a osie kolejnych gniazd są od siebie oddalone o 15 mm. Zestaw wkrętek z otworami gazowymi pozwala na precyzyjne dostosowanie średnicy i kształtu otworu gazowego lub na całkowite zaślepienie gniazda w lufie. Na bocznej powierzchni lufy wykonano trzy gniazda przystosowane do montażu piezoelektrycznych przetworników ciśnienia. Osie gniazd pod przetworniki ciśnienia przecinają się z osiami gniazd pod wkrętki i są do nich prostopadłe.



Rys. 4.3. Lufa: 1 – powierzchnia współpracująca z komorą gazową, 2 – wkrętka zaślepiająca, 3 – wkrętka z otworem gazowym, 4 – gniazda przeznaczone do montażu czujników ciśnienia

Nasada jest elementem, w którym mocuje się lufę. Lufa jest ustalana w niej kątowno za pomocą kołka ustalającego, a liniowo (jednocześnie niwelując luzy) – za pomocą nakrętki lufy. Nasada umożliwia montaż różnego rodzaju luf zgodnych ze standardem badań określonym w NATO AEP-97 [56]. Nasada jest mocowana do szyny uniwersalnej za pośrednictwem podpory ruchomej, dzięki której możliwy jest ruch liniowy całego zespołu nasady z lufą i komorą gazową wzdłuż tej szyny. Do nasady zamocowano prowadnice, po których przemieszcza się zespół suwadła z zamkiem.

Zespół komory gazowej z tłokiem (rys. 4.4) składa się z komory gazowej, łącznika, tłoka gazowego, tłoczyska oraz uszczelnień. Komora gazowa jest głównym elementem układu opóźnienia gazowego zamka. W cylindrze komory pracuje tłok gazowy z tłoczyskiem. Komora gazowa łączy się z lufą za pomocą czterech kołków ustalających, zapewniających współosiowość otworów gazowych. Stabilność i odpowiedni docisk komory gazowej do lufy zapewniają płytki montażowe (4 na rys. 4.2), które są mocowane śrubami do nasady. Powierzchnia łączenia komory gazowej z lufą była bazą do wykonania trzech otworów gazowych, które po połączeniu elementów są współosiowe z gniazdami w lufie. Podczas strzału, gazy prochowe przedostają się wybranym otworem z lufy do cylindra komory gazowej. Do uszczelnienia połączenia w okolicy otworów gazowych służy uszczelka płaska wykonana z miedzi. Otwory te są również współosiowe z gniazdami, przeznaczonymi do montażu piezoelektrycznych przetworników ciśnienia.



Rys. 4.4. Zespół komory gazowej z tłokiem: 1 – komora gazowa, 2 – gniazda przeznaczone do montażu czujników ciśnienia, 3 – łącznik, 4 – tłok gazowy, 5 – tłoczysko, 6 – otwory gazowe z uszczelką płaską, 7 – uszczelnienie tłoczyska

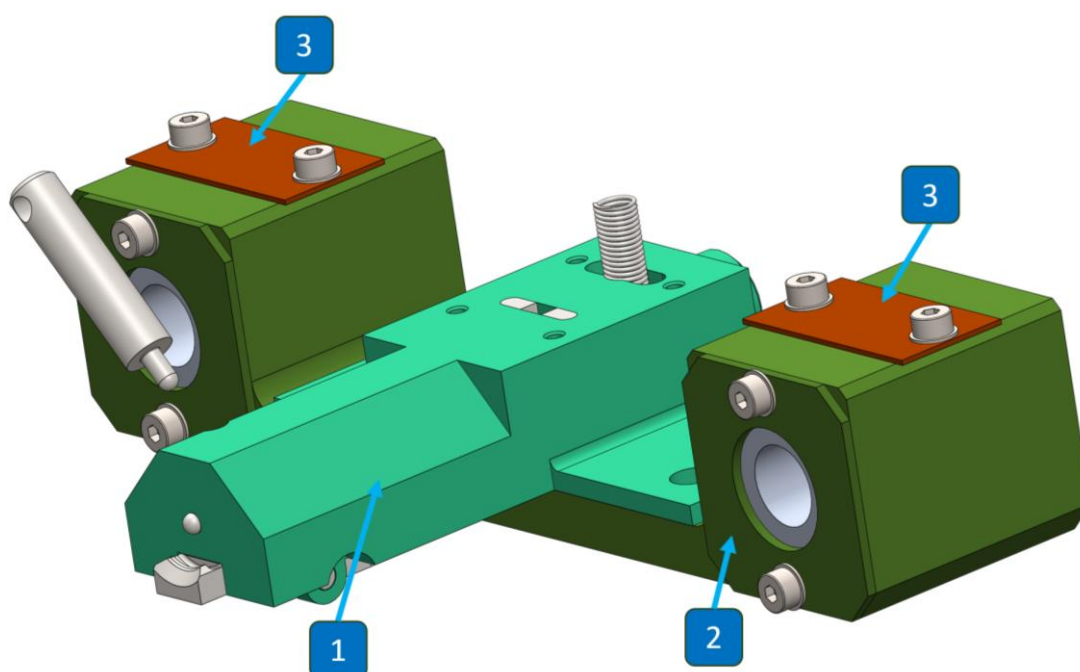
Tłok gazowy jest elementem, na który podczas strzału działała ciśnienie gazów prochowych. Tłok jest uszczelniany w cylindrze komory gazowej labiryntowo. W tylnej części, tłok gazowy ma gwintowany otwór, do którego przyłączone jest tłoczysko. Zestaw tłoczysk o różnych długościach i średnicach służy do zmiany dwóch parametrów układu: objętości komory gazowej oraz powierzchni czynnej tłoka

gazowego. Od strony wlotu, cylinder komory gazowej uszczelniano teflonową tuleją, która współpracuje z tłoczyskiem w czasie jego ruchu. Tuleja jest elementem wymiennym, dostosowanym do średnicy tłoczyska.

Łącznik jest elementem, który spełnia kilka funkcji. Pierwszą z nich jest połączenie tłoczyska z zespołem zamka. Połączenie to jest tak zaprojektowane, aby wprowadzić luzy niezbędne do wzajemnego współdziałania tych części. Do tylnej powierzchni łącznika, połączeniem gwintowym, montowany jest zespół urządzenia powrotnego. Dodatkowo, tylna ściana łącznika pełni funkcję płaszczyzny pomiarowej dla laserowego czujnika przemieszczenia, natomiast jego dolna powierzchnia współpracuje ze sprężyną zaczepu iglicy. Tłok z tłoczyskiem i łącznikiem stanowi część zespołu odrzucanego stanowiska laboratoryjnego.

4.1.2. Zespół suwadła z zamkiem

Zespół suwadła z zamkiem (rys. 4.5) to główny element zespołu odrzucanego, który zawiera: zespół suwadła, zespół zamka oraz płytki masowe (opcjonalnie).

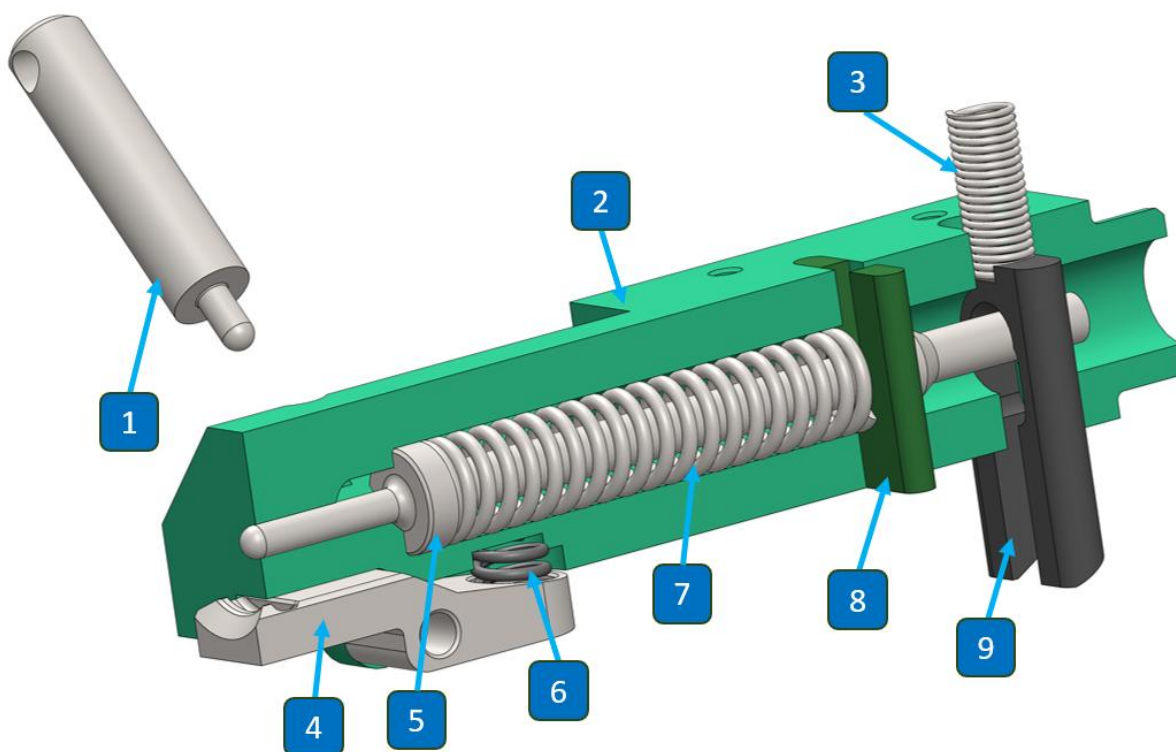


Rys. 4.5. Zespół suwadła z zamkiem:
1 – zespół zamka, 2 – zespół suwadła, 3 – płytki masowe

Zespół suwadła jest elementem ruchomym przemieszczającym się pomiędzy zespołem nasady z lufą i komorą gazową, a zespołem mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia na prowadnicach (8 na rys. 4.1).

Zespół suwadła połączono z prowadnicami za pomocą łożysk. Do suwadła można zamocować płytki masowe o masach 1, 2, 4 lub 8 g, pozwalające na zmianę masy zespołu odrzucanego. Do zespołu suwadła przykręcany jest zespół zamka i łącznik.

Zespół zamka (rys. 4.6) służy do zamknięcia przewodu lufy przed strzałem, zainicjowania strzału oraz wyciągnięcia łuski z komory nabojewej po strzale. Zespół ten składa się z: bezpiecznika, korpusu zamka, sprężyny zaczepu iglicy, pazura wyciągu, iglicy, sprężyny wyciągu, sprężyny uderzeniowej, opory sprężyny uderzeniowej oraz zaczepu iglicy.



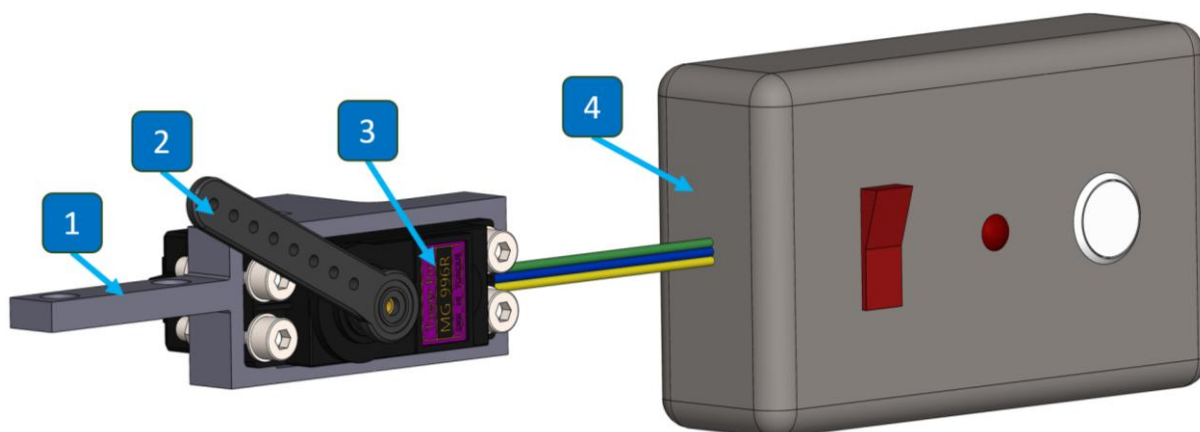
Rys. 4.6. Zespół zamka: 1 – bezpiecznik, 2 – korpus zamka, 3 – sprężyna zaczepu iglicy, 4 – pazur wyciągu, 5 – iglica, 6 – sprężyna wyciągu, 7 – sprężyna uderzeniowa, 8 – opora sprężyny uderzeniowej, 9 – zaczep iglicy

Korpus zamka jest elementem łączącym wszystkie części zespołu zamka. W jego wnętrzu znajduje się igliczny mechanizm uderzeniowy, składający się z: iglicy (służy do zainicjowania strzału), sprężyny uderzeniowej (nadaje iglicy energię wystarczającą do zainicjowania strzału) oraz zaczepu iglicy, który współpracuje z dźwignią mechanizmu spustowego i blokuje iglicę w tylnym położeniu przed strzałem. Za prawidłowe działanie zaczepu iglicy odpowiada sprężyna zaczepu iglicy, której gniazdo znajduje się w łączniku (3 na rys. 4.4). W korpusie zamka usytuowano również

opore sprężyny uderzeniowej, służącą do ustalenia położenia sprężyny uderzeniowej w korpusie i jej wstępnego napięcia. W przedniej części korpusu zamka znajduje się pazur wyciągu ze sprężyną wyciągu, służący do wyciągnięcia (ekstrakcji) łuski z komory naboջowej po strzale. Ponadto, zespół zamka wyposażono w bezpiecznik, który zabezpiecza przed przypadkowym strzałem, poprzez zamknięcie kanału iglicznego przy napiętym mechanizmie uderzeniowym.

4.1.3. Zespół mechanizmu spustowego

Zespół mechanizmu spustowego (rys. 4.7), służący do zdalnego zainicjowania strzału, składa się z: korpusu mechanizmu spustowego, dźwigni mechanizmu spustowego, serwomechanizmu i elektrospustu.

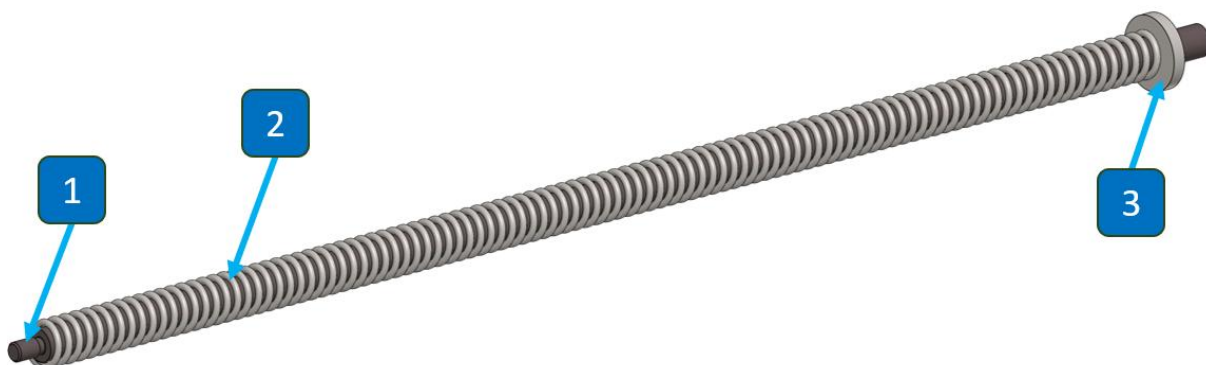


Rys. 4.7. Zespół mechanizmu spustowego: 1 – korpus mechanizmu spustowego, 2 – dźwignia mechanizmu spustowego, 3 – serwomechanizm, 4 – elektrospust

Zespół mechanizmu spustowego połączono ze stałą podporą (10 na rys. 4.1) za pośrednictwem korpusu mechanizmu spustowego w sposób umożliwiający współpracę z zaczepem iglicy (9 na rys. 4.6). Do serwomechanizmu przyłączona jest dźwignia mechanizmu spustowego współpracująca z tym zaczepem. Serwomechanizm jest podłączony przewodami do elektrospustu, który umożliwia regulację zakresu działania dźwigni mechanizmu spustowego i bezpieczne zainicjowanie strzału. Elektrospust wyposażono w przełącznik trybu gotowości, kontrolkę sygnalizującą gotowość do oddania strzału oraz przycisk uruchamiający proces strzału. Po jego naciśnięciu, serwomechanizm poprzez dźwignię oddziałuje na zaczep iglicy, podnosząc go do góry i powodując zwolnienie iglicy oraz jej ruch pod wpływem sprężyny uderzeniowej. Iglica nakłuwą spłonkę naboջu i następuje strzał.

4.1.4. Zespół urządzenia powrotnego

Zespół urządzenia powrotnego (rys. 4.8) służy do utrzymania zespołu odrzucanego w przednim położeniu przed strzałem oraz jego powrót do położenia wyjściowego po strzale.



Rys. 4.8. Zespół urządzenia powrotnego:
1 – żerdź, 2 – sprężyna powrotna 3 – opora sprężyny powrotnej

Zespół urządzenia powrotnego składa się z: żerdzi, sprężyny powrotnej oraz opory sprężyny powrotnej. Żerdź, na której pracuje sprężyna powrotna, jest połączona z łącznikiem za pomocą gwintu. Opora sprężyny powrotnej jest elementem pośrednim pomiędzy sprężyną powrotną a modulem mocującym przednim.

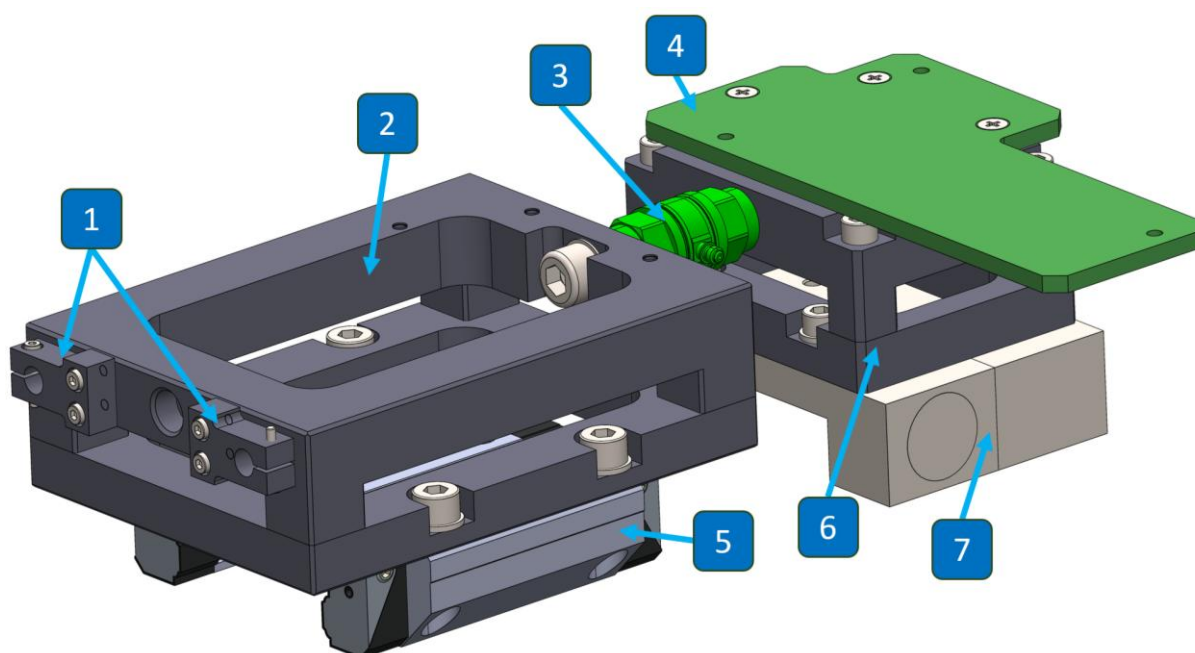
4.1.5. Zespół mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia

Zespół mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia (rys. 4.9) stanowi podstawę do montażu obu czujników. Zespół ten ma dwa zasadnicze moduły: moduł mocujący przedni i moduł mocujący tylny, które różnią się sposobem zamocowania do szyny uniwersalnej.

Moduł mocujący przedni zamocowano do szyny poprzez łożyskowaną ruchomą podporę, umożliwiającą przemieszczanie liniowe modułu wzdłuż prowadnicy uniwersalnej. W module tym wykonano otwór oraz podcięcie przeznaczone do współpracy z zespołem urządzenia powrotnego. Ponadto, do modułu zamocowano blokady prowadnic, służące do połączenia zespołu (mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia) z nasadą (poprzez prowadnice). Dodatkowo, blokady te umożliwiają płynną regulację długości drogi odrzutu i wstępnego napięcia sprężyny powrotnej poprzez skracanie lub wydłużanie części czynnej prowadnic.

Moduł mocujący tylny zamocowano do szyny uniwersalnej poprzez stałą podporę blokującą jego ruch względem szyny.

Oba moduły mocujące, połączone ze sobą za pomocą piezoelektrycznego czujnika siły, przystosowano – poprzez podstawę laserowego czujnika przemieszczenia – do zamontowania laserowego czujnika przemieszczenia.



Rys. 4.9. Zespół mocowania czujnika siły i laserowego czujnika przemieszczenia:
1 – blokady przewodnic, 2 – moduł mocujący przedni, 3 – piezoelektryczny czujnik siły,
4 – podstawa laserowego czujnika przemieszczenia, 5 – podpora ruchoma,
6 – moduł mocujący tylny, 7 – podpora stała

4.1.6. Zespół podstawy

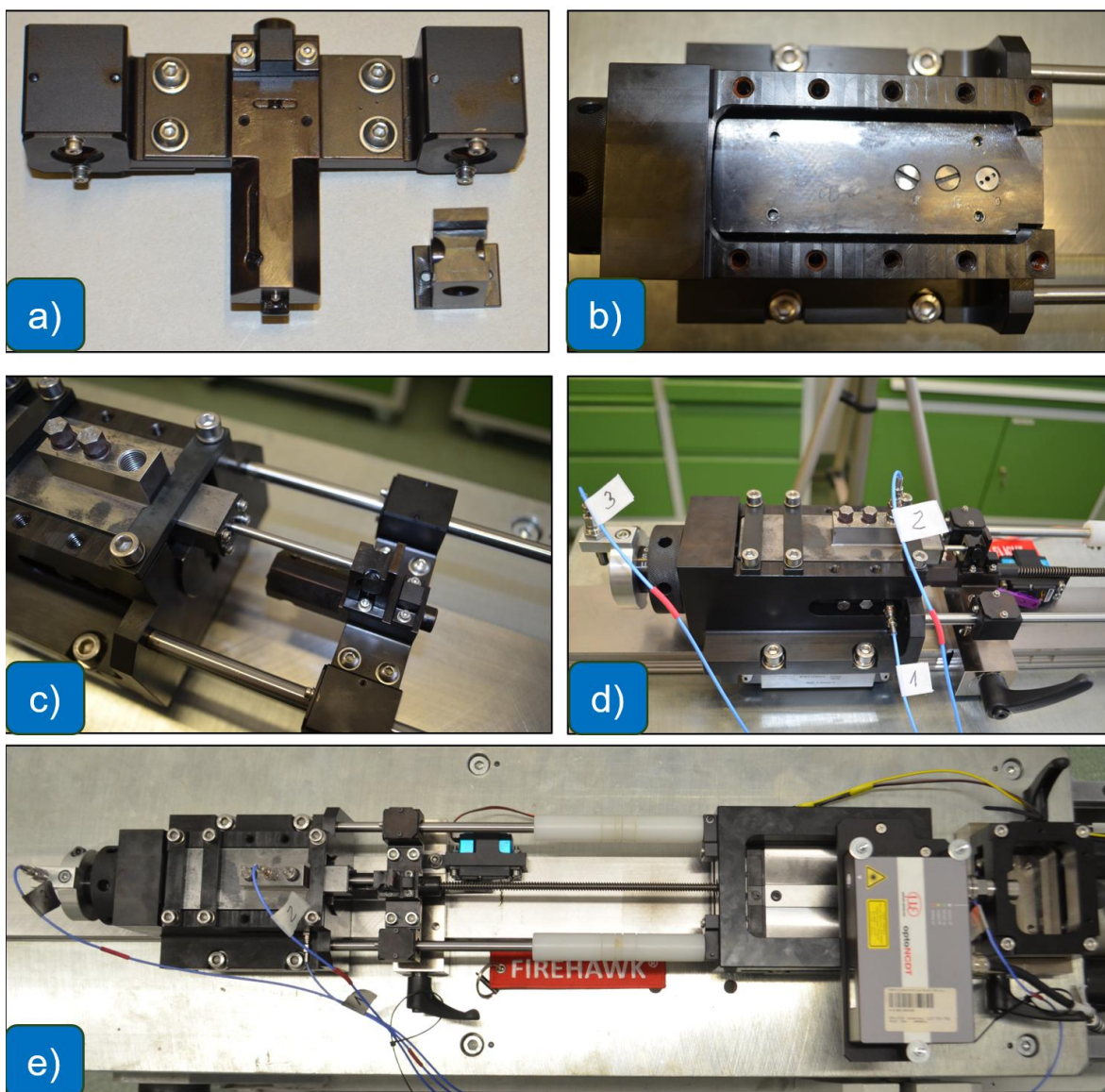
Zespół podstawy składa się z szyny uniwersalnej (6 na rys. 4.1), przystosowanej do montażu na niej podpór ruchomych (7 na rys. 4.1) i podpór stałych (10 na rys. 4.1). Zasadniczą funkcją podstawy jest połączenie w całość pozostałych¹³ zespołów stanowiska laboratoryjnego. Podpory ruchome są ułożyskowane i mogą przemieszczać się liniowo po szynie uniwersalnej. Na podporach ruchomych osadzono zespół nasady z lufą i komorą gazową oraz moduł mocujący przedni (2 na rys. 4.9). Do podpór stałych przykręcono zespół mechanizmu spustowego oraz moduł mocujący tylni.

¹³ Poza zespołem suwadła z zamkiem, który jest zamontowany na przewodnicach (8 na rys. 4.1).

4.1.7. Wykonanie i montaż stanowiska laboratoryjnego

Opracowana dokumentacja konstrukcyjna stanowiska laboratoryjnego była podstawą do wykonania jego elementów przez dwie firmy, gwarantujące odpowiednią jakość. Wykonanie lufy zlecono czeskiej firmie Prototypa, natomiast pozostałych elementów – Fabryce Broni „Łucznik”-Radom Sp. z o.o.

Po dostarczeniu wszystkich komponentów, zmontowano, skonfigurowano i przetestowano stanowisko. Niektóre fazy montażu i konfiguracji stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na fot. 4.1.



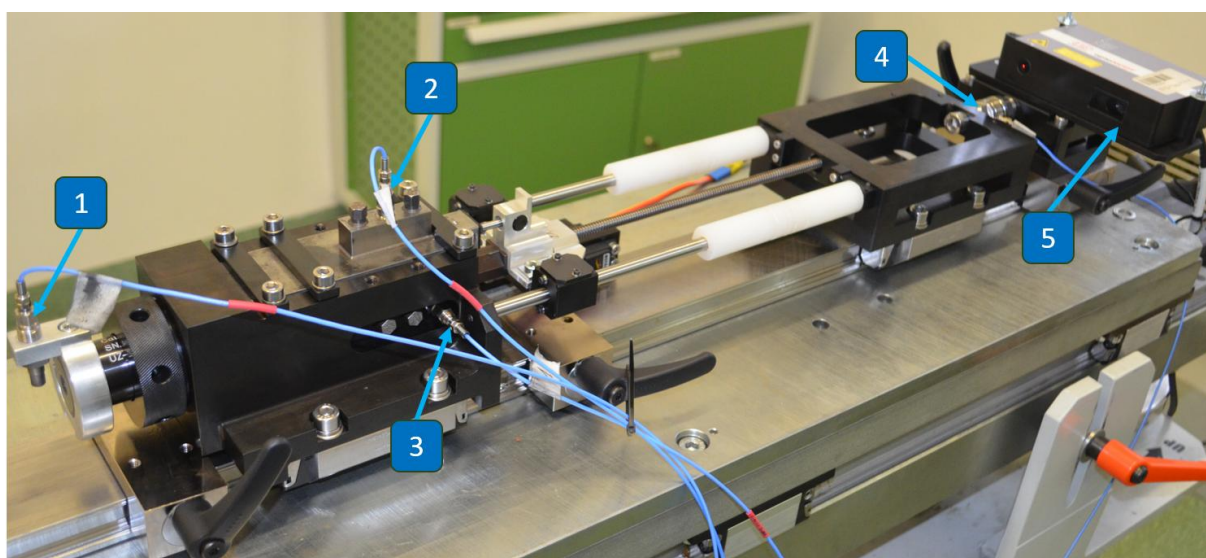
Fot. 4.1. Niektóre fazy montażu i konfiguracji stanowiska laboratoryjnego:

- a) zmontowany zespół suwadła z zamkiem i pierwsza wersja łącznika, b) zmontowana nasada z lufą, c) zmontowany zespół nasady z lufą i komorą gazową połączony z zespołem suwadła z zamkiem, d) zmontowana przednia część stanowiska laboratoryjnego, e) zmontowane stanowisko laboratoryjne gotowe do testowania

4.2. Charakterystyka części pomiarowej stanowiska laboratoryjnego

Jakość systemu pomiarowego stanowiska stanowi kluczowy element w procesie prowadzenia badań doświadczalnych. Dokładność pomiarów decyduje bowiem o wiarygodności uzyskanych wyników, co ma bezpośredni wpływ na ich interpretację i rzetelne wnioskowanie. Dlatego w procesie budowania stanowiska laboratoryjnego zwrócono szczególną uwagę na wyeliminowanie możliwych zakłóceń w pracy stanowiska, mogących mieć wpływ na wyniki pomiarów.

Głównym celem pomiarów prowadzonych na stanowisku laboratoryjnym było określenie prędkości zespołu odrzucanego w funkcji czasu $v_{zo}(t)$, która jest najistotniejszym parametrem z punktu widzenia skutecznego działania broni z OZPOG. Aby określić tą prędkość, podczas strzału rejestrowano przemieszczenie zespołu odrzucanego w funkcji czasu $x_{zo}(t)$. Ponadto, podczas badań rejestrowano: chwilę wylotu pocisku z lufy t_w , ciśnienie w komorze gazowej w funkcji czasu $p_{kg}(t)$, ciśnienie w przestrzeni zapociskowej przewodu lufy w funkcji czasu $p(t)$, siły oddziaływania stanowiska laboratoryjnego na podstawę w funkcji czasu $F_{pd}(t)$ oraz prędkość pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy V_2 . Stanowisko laboratoryjne z wyszczególnionymi elementami systemu pomiarowego przedstawiono na fot. 4.2.



Fot. 4.2. Stanowisko laboratoryjne z elementami systemu pomiarowego:
1 – czujnik wylotu pocisku z lufy, 2 – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia w komorze gazowej, 3 – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia w lufie, 4 – piezoelektryczny czujnik siły, 5 – laserowy czujnik przemieszczenia

Do pomiaru przemieszczenia zespołu odrzucanego w funkcji czasu wykorzystano laserowy czujnik przemieszczenia Micro-Epsilon ILD1750-750, który zamontowano

na module mocującym tylnym. Współpracuje on z płaską powierzchnią znajdującą się na łączniku, który jest elementem zespołu odrzucanego i porusza się podczas strzału. Prędkość zespołu odrzucanego obliczano poprzez zróżniczkowanie przebiegu przemieszczenia zespołu odrzucanego po czasie.

Określenie chwili wylotu pocisku z lufy realizowano za pomocą czujnika wylotu AVL 5CP500, umieszczonego bezpośrednio za płaskim wylotowym lufy. Chwila wylotu pocisku z lufy była wykorzystywana w niektórych przypadkach do interpretacji wyników innych pomiarów.

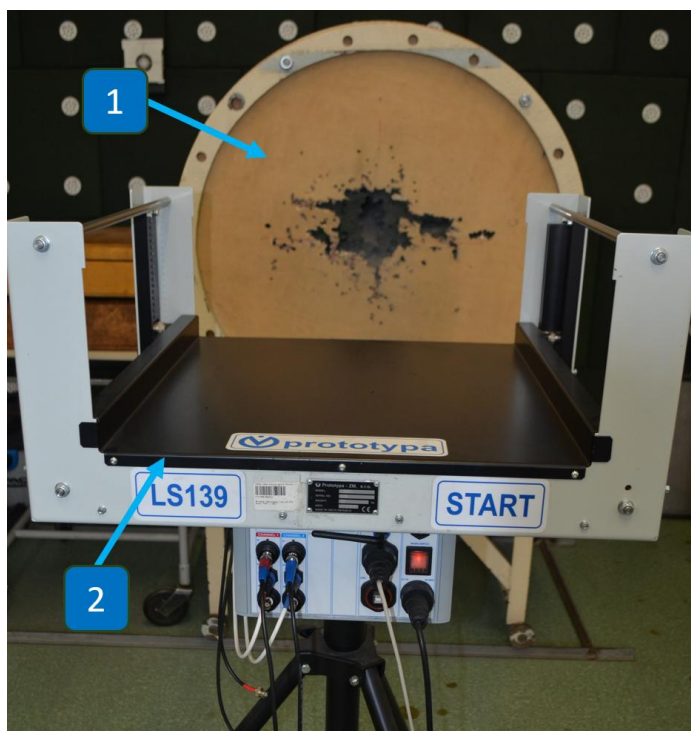
Pomiary ciśnienia w komorze gazowej wykonywano za pomocą piezoelektrycznych przetworników ciśnienia Kistler 6215. Stanowisko laboratoryjne umożliwia dokonywanie pomiaru ciśnienia w cylindrze komory gazowej w trzech miejscach oddalonych od siebie o 15 mm. Gniazda pod czujniki są współosiowe z otworami gazowymi w komorze gazowej i lufie.

Pomiary ciśnienia w przestrzeni zapociskowej przewodu lufy wykonywano za pomocą piezoelektrycznych przetworników ciśnienia Kistler 6215. Również i w tym przypadku stanowisko umożliwia dokonywanie pomiaru ciśnienia w lufie w trzech miejscach oddalonych od siebie o 15 mm. Skrajne gniazdo usytuowano w odległości 21,5 mm od płasku wlotowego lufy.

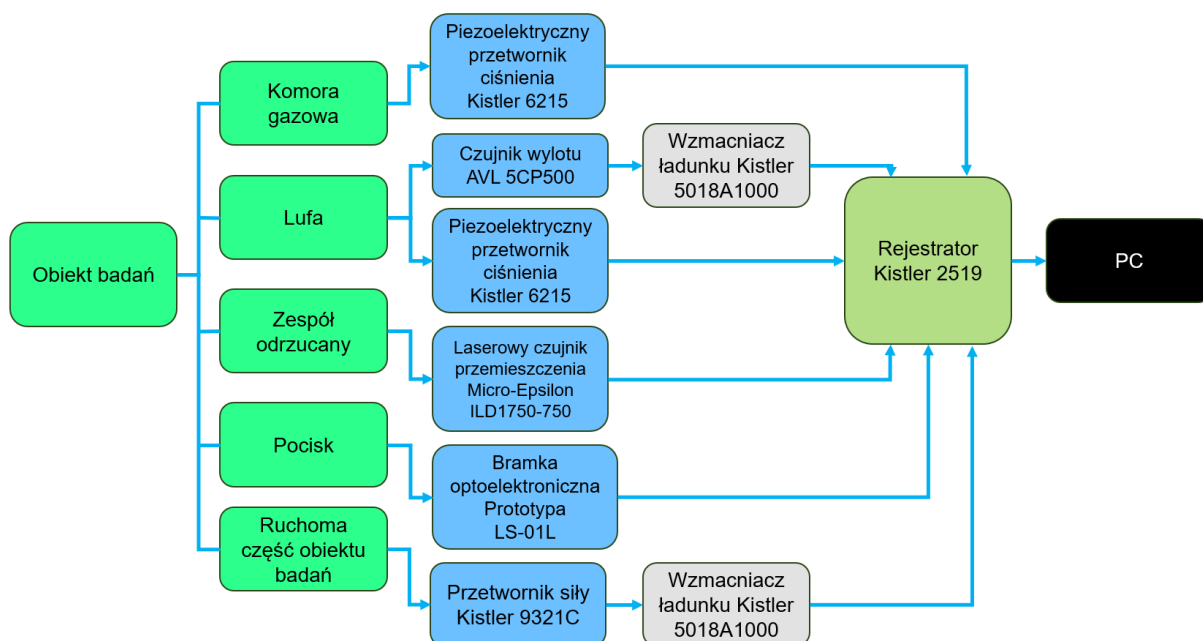
Do pomiaru siły oddziaływania stanowiska na podstawę wykorzystywano piezoelektryczny przetwornik siły Kistler 9321C, który zamontowano pomiędzy dwoma modułami mocującymi. Ze względu na to, że nasada i moduł mocujący przedni osadzono na ruchomych podporach, istnieje możliwość pomiaru siły oddziaływania stanowiska na podstawę poprzez moduł mocujący tylny, osadzony na nieruchomej podporze.

Do określenia prędkości pocisku na torze lotu zastosowano optoelektryczną bramkę Prototypa LS-01L (fot. 4.3), która ma dwa zestawy diod LED i fotodetektorów oddalonych od siebie o 500 mm. Przelot pocisku przez pierwszą parę fotoelementów uruchamia licznik, a przelot przez drugą parę fotoelementów zatrzymuje licznik. Znając czas przelotu pocisku i odległość pomiędzy fotodetektorami, oprogramowanie oblicza prędkość pocisku.

Schemat systemu pomiarowego stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 4.10.



Fot. 4.3. Stanowisko do określania prędkości pocisku na torze lotu:
1 – kulochwyt, 2 – bramka optoelektroniczna Prototypa LS-01L



Rys. 4.10. Schemat układu pomiarowego stanowiska laboratoryjnego

Wykorzystany w układzie pomiarowym stanowiska rejestrator Kistler 2519 wyposażono w dwa kanały ładunkowe i cztery kanały napięciowe. Kanały ładunkowe mają zintegrowane wzmacniacze ładunku. W celu możliwie najmniej zaburzonego pomiaru powiązanych ze sobą wielkości, do kanałów tych podłączono

piezoelektryczne czujniki ciśnienia zamontowane w komorze gazowej i lufie. Laserowy czujnik przemieszczenia i bramkę optoelektroniczną bezpośrednio podłączono do rejestratora. Natomiast, aby umożliwić podłączenie czujnika wylotu i przetwornika siły do kanałów napięciowych rejestratora, niezbędne było wykorzystanie dwóch wzmacniaczy ładunku Kistler 5018A1000. Podłączenie wszystkich elementów pomiarowych systemu do jednego rejestratora pozwoliło na zachowanie jednej podstawy czasu dla wszystkich przebiegów zmian mierzonych wielkości. Rejestrator Kistler 2519 podłączono do komputera klasy PC z oprogramowaniem BA Control firmy Kistler.

Urządzeniami wykorzystywanymi w badaniach, a nienależącymi bezpośrednio do układu pomiarowego, były również: Termohigrobarometr LB-715, kamera GoPro Hero 11 oraz waga analityczna Radwag AS 310.R2.

Termohigrobarometr z panelem odczytowym LB-755 wykorzystywano do sprawdzania środowiskowych warunków badań (wilgotności i temperatury powietrza), kamerę – do rejestrowania przebiegu badań, a wagę analityczną – do pomiaru masy zespołu odrzucanego, każdorazowo po zmianie jego masy.

Podstawowe parametry aparatury wykorzystanej w badaniach na stanowisku laboratoryjnym przedstawiono w **załączniku nr 1** do niniejszej pracy.

4.3. Opis funkcjonalności stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne w konfiguracji przygotowanej do prowadzenia badań ma możliwość zmiany pięciu parametrów konstrukcyjnych (tzw. parametrów wejściowych obiektu), które przedstawiono w tab. 4.1. Parametry te wytypowano na podstawie wniosków z analizy stanu techniki w dziedzinie automatycznej broni palnej działającej na zasadzie odrzutu zamka swobodnego i zamka półswobodnego przedstawionej w [2]. Każdy z parametrów można zmieniać w zakresie trzech wartości, co wynika z założonego planu eksperymentu.

Tab. 4.1. Wykaz parametrów stanowiska laboratoryjnego wraz z trzema wartościami ich zmienności

Nazwa parametru	J.m.	Wartości		
Odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy	mm	21,5	36,5	51,5
Średnica otworu gazowego	mm	1,0	1,4	1,8

Tab. 4.1. c.d. Wykaz parametrów stanowiska laboratoryjnego wraz z trzema wartościami ich zmienności

Nazwa parametru	J.m.	Wartości		
Masa zespołu odrzucanego	g	360	390	420
Średnica tłoczyska	mm	4	5	6
Długość tłoczyska	mm	91	96	101

Dla stanowiska laboratoryjnego zdefiniowano następujące funkcjonalności:

- możliwość eksperymentalnego określenia odpowiedzi obiektu badań na zmianę parametrów wymienionych w tab. 4.1;
- możliwość eksperymentalnego określenia współczynnika strat przepływu gazów prochowych z lufy do komory gazowej oraz wpływu zmian poszczególnych parametrów układu (wymienionych w tab. 4.1) na wartość tego współczynnika;
- możliwość eksperymentalnego określenia wrażliwości obiektu na amunicję charakteryzującą się odmiennymi parametrami balistycznymi¹⁴;
- możliwość eksperymentalnego określenia wpływu działania układu tego typu na spadek energii kinetycznej pocisku;
- możliwość eksperymentalnego badania sprawności różnych typów uszczelnień tłoka i tłoczyska;
- potencjalna możliwość eksperymentalnego wyznaczenia przebiegu dynamicznego oddziaływania pocisku z lufą.

W związku z tym, że stanowisko laboratoryjne ma strukturę modułową, jest przystosowane do wymiany części i zespołów na inne, które mogą umożliwić badanie różnych mechanizmów stosowanych w automatycznej broni palnej z wykorzystaniem różnych typów amunicji.

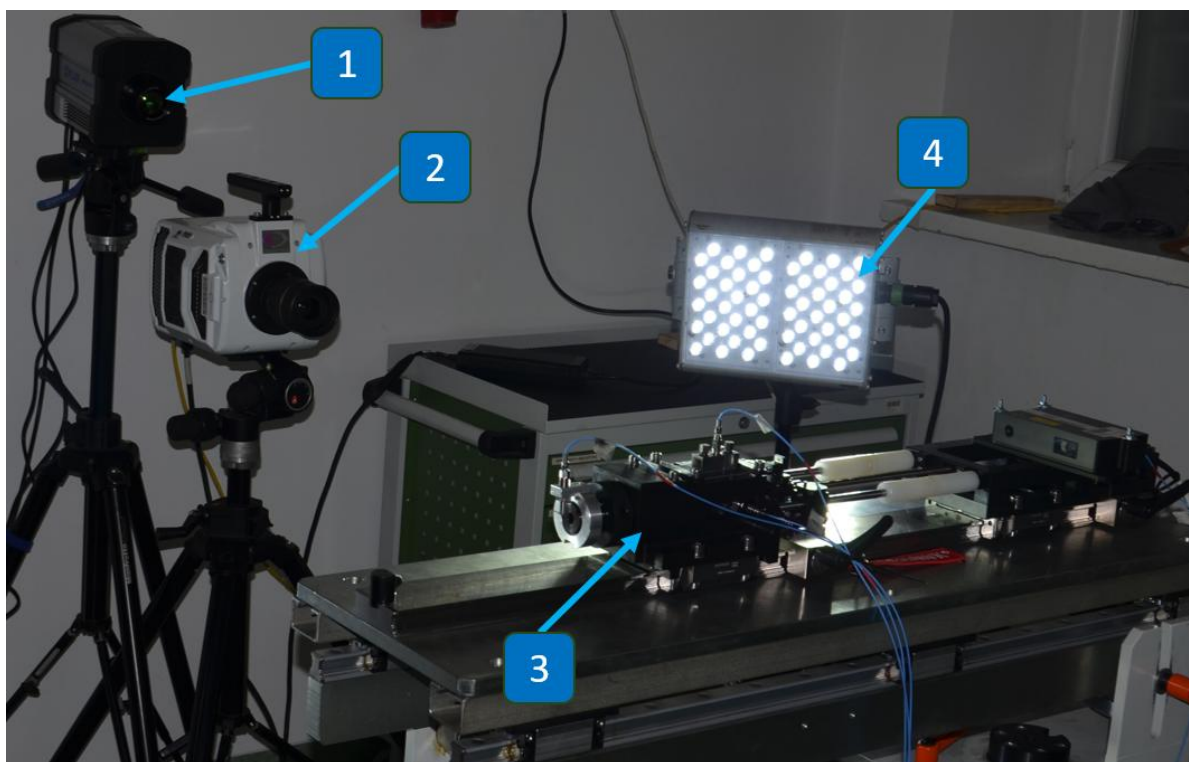
4.4. Opis testowania stanowiska laboratoryjnego

W celu przeprowadzenia testów stanowiska laboratoryjnego do badań doświadczalnych automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG opracowano

¹⁴ 9 mm nabój PARA jest produkowany przez licznych producentów w wielu wariantach, różniących się parametrami balistycznymi (np. energią kinetyczną pocisku, ciśnieniem maksymalnym w lufie).

Metodykę nr 1, będącą częścią „Programu badań”, przedstawionego w **załączniku nr 2** do niniejszej pracy.

Głównym celem badań testujących stanowiska laboratoryjnego było sprawdzenie poprawności działania jego mechanizmów, skuteczności działania uszczelnienia zespołu komory gazowej z tłokiem oraz dotarcie przewodu lufy (szczególnie otworów gazowych). Podczas testowania stanowiska wykorzystano termowizyjną kamerę do zdjęć szybkich FLIR SC6800 i kamerę do zdjęć szybkich Phantom v1612, których podstawowe parametry przedstawiono w **załączniku nr 1** do niniejszej pracy. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do badań testujących zaprezentowano na fot. 4.4.



Fot. 4.4. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do badań testujących:
1 – termowizyjna kamera szybka, 2 – kamera do zdjęć szybkich, 3 – obiekt badań,
4 – oświetlacz

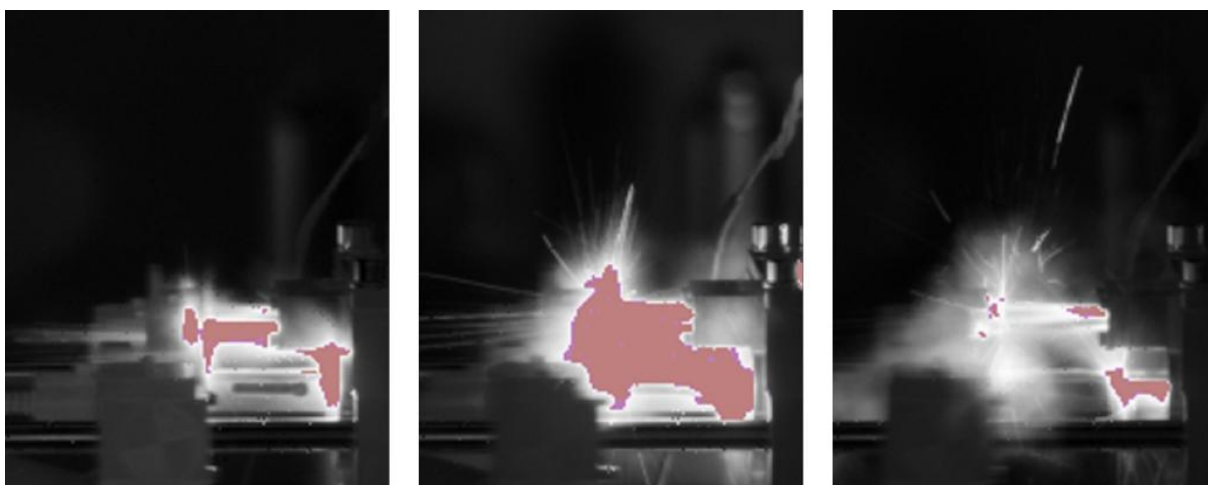
Termowizyjną kamerę do zdjęć szybkich wykorzystano do sprawdzenia skuteczności działania uszczelnienia cylindra komory gazowej z tłokiem i tłoczyskiem oraz komory gazowej z lufą. Analiza zdjęć z tej kamery potwierdziła skuteczność działania uszczelnienia pomiędzy lufą i komorą gazową oraz uszczelnienia labiryntowego tłoka gazowego. Jednak, na zarejestrowanych klatkach (fot. 4.5) dostrzeżono wadę działania uszczelnienia tłoczyska (strzałką zaznaczono strumień

gazów prochowych przedostający się w miejscu i kierunku nieprzewidzianym w projekcie).



Fot. 4.5. Wybrane klatki z zapisu szybkiej kamery termowizyjnej, które ujawniły wadę działania uszczelnienia tłoczyska (strzałką zaznaczono strumień gazów prochowych przedostający się w miejscu i kierunku nieprzewidzianym w projekcie)

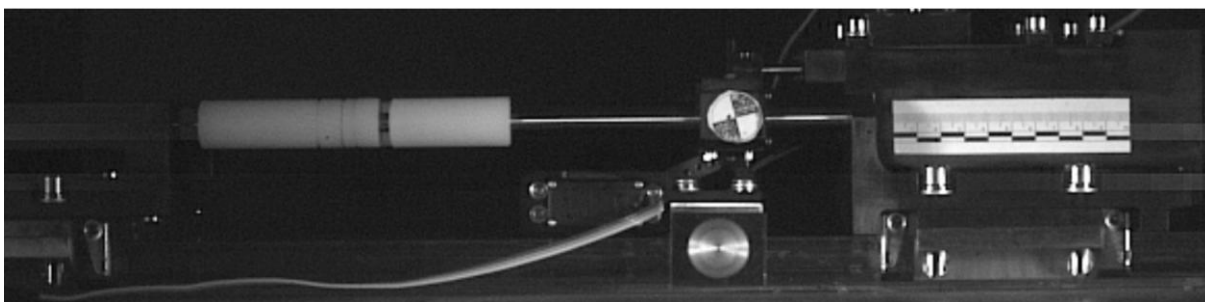
Dostrzeżony problem rozwiązano poprzez zastosowanie dodatkowej metalowej podkładki pomiędzy tulejką uszczelniającą a osłoną. Wybrane klatki z zapisu próby zarejestrowanej przez szybką kamerę termowizyjną po wprowadzeniu poprawek uszczelnienia tłoczyska przedstawiono na fot. 4.6. Zapis z kamery potwierdził skuteczność przyjętej modyfikacji.



Fot. 4.6. Wybrane klatki z zapisu szybkiej kamery termowizyjnej po wprowadzeniu poprawek uszczelnienia tłoczyska

W celu sprawdzenia działania mechanizmów stanowiska laboratoryjnego wykorzystano kamerę do zdjęć szybkich Phantom v1612, a przykładowy kadr zakresu

jej pola widzenia przedstawiono na fot. 4.7. Przeprowadzone badania testujące stanowiska laboratoryjnego pozwoliły na sformułowanie wniosków, które umożliwiły jego dalszą modyfikację w zakresie: zaczepu zamka, konstrukcji łącznika i sposobu jego połączenia z zespołem zamka, sposobu mocowania urządzenia powrotnego, zmian w iglicznym mechanizmie uderzeniowym, konstrukcji mechanizmu spustowego i elektroszystu oraz mocowania zespołu zamka do zespołu suwadła.



Fot. 4.7. Przykładowy kadr zakresu pola widzenia kamery szybkiej Phantom v1612

4.5. Podsumowanie rozdziału IV

Na podstawie zrealizowanego etapu IV należy stwierdzić, że:

- dokumentację konstrukcyjną oryginalnego stanowiska laboratoryjnego do badania układu z OZPOG opracowano zgodnie z obowiązującymi w MON standardami i mogła być ona podstawą do jego wykonania;
- elementy stanowiska laboratoryjnego zostały wykonane zgodnie z dostarczoną dokumentacją konstrukcyjną przez Fabrykę Broni „Łucznik”-Radom Sp. z o.o. i firmę Prototypa, pod nadzorem merytorycznym autora niniejszej pracy doktorskiej. Stanowisko zmontowano i uruchomiono w Laboratorium Systemów Uzbrojenia ITU WML WAT;
- stanowisko laboratoryjne wyposażono w nowoczesną aparaturę pomiarową (gwarantującą wymaganą jakość uzyskiwanych wyników badań) oraz w wysokiej klasy urządzenia rejestrująco-archiwizujące. Oprzyrządowanie pomiarowe stanowiska jest dostępne w ITU WML WAT, a jego charakterystyki przedstawiono w **załączniku nr 1** do niniejszej pracy;
- testy zmontowanego stanowiska laboratoryjnego przeprowadzone przez autora niniejszej pracy potwierdziły jego bezpieczne i niezawodne działanie, a także umożliwiły przeprowadzenie wnikliwej analizy jego pracy i sformułowanie

stosownych wniosków. Wnioski te zaowocowały wprowadzeniem w stanowisku ponad 20 modyfikacji konstrukcyjnych, które pozytywnie wpłynęły na jego funkcjonowanie;

- stanowisko laboratoryjne ma budowę modułową, jest podatne na modyfikację i rozbudowę oraz użycie w różnych konfiguracjach badawczych;
- stanowisko laboratoryjne do badania odrzutu zamka jest oryginalnym w skali światowej rozwiązaniem technicznym chronionym patentem PL 247883.

Strona celowo zostawiona pusta

ROZDZIAŁ V

BADANIA DOCELOWEJ AMUNICJI PISTOLETOWEJ WYKORZYSTANEJ DO BADAŃ UKŁADU AUTOMATYKI BRONI Z OZPOG

Określenie parametrów amunicji wykorzystanej w badaniach było jednym z ważniejszych przedsięwzięć, mających na celu pozyskanie danych niezbędnych do walidacji modelu matematycznego pracy układu z OZPOG opisanej w [2]. W pierwszej kolejności dokonano wyboru amunicji i prochów planowanych do wykorzystania w badaniach na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. W związku z tym, że proces pozyskiwania materiałów do badań przypadł na szczyt pandemii COVID-19, zaistniały ograniczenia w dostępności amunicji i prochów strzeleckich w ilościach potrzebnych do przeprowadzenia planowanych badań (wymagana była amunicja z jednej partii produkcyjnej). Dotyczyło to również amunicji firm BLAZER i S&B, którą badano na wstępnym etapie prac (opisanych w podrozdziale 2.1). Z tego powodu zakupiono amunicję PARA z pociskiem pełnopłaszczkowym o masie 8 g firmy GECO z partii 53J 0227 (fot. 5.1) oraz prochy pistoletowe Reload Swiss RS20 i LOVEX D036. Ponadto, w związku z niemożliwością zakupu łusek i pocisków PARA, do badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu z OZPOG wykorzystano pociski i łuski pozyskane w procesie deelaboracji amunicji PARA GECO.



Fot. 5.1. Amunicja PARA GECO wykorzystana do badań na stanowisku laboratoryjnym

Docelową amunicję PARA GECO poddano następującym badaniom:

- masowym, mającym na celu ustalenie powtarzalności mas pocisków i naważek prochowych;

- charakterystyk balistycznych, mającym na celu określenie przebiegów ciśnienia w łusce oraz prędkości pocisków na torze lotu;
- siły rozcalania i powtarzalności elaboracji, mającym na celu określenie przebiegów tej siły oraz wpływu elaboracji na charakterystyki balistyczne amunicji.

5.1. Badania masowe amunicji

W celu określenia wartości mas pocisków i ładunków prochowych amunicji PARA GECO wykonano pomiary na wadze analitycznej RADWAG AS 310.R2, której podstawowe parametry przedstawiono w **załączniku nr 1**. Wyniki badań masowych 9 sztuk nabojuw PARA GECO przedstawiono w tab. 5.1.

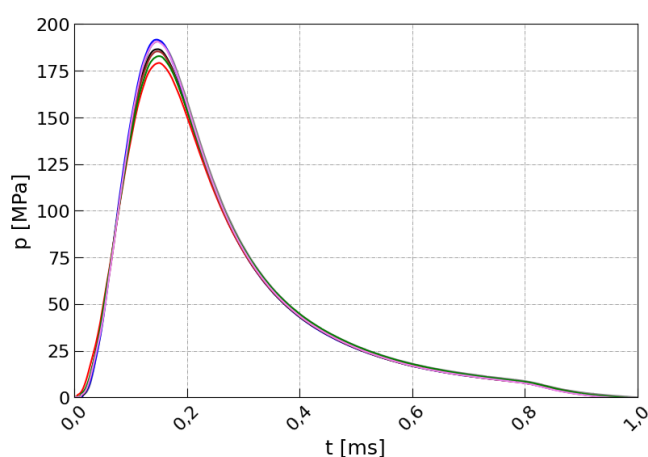
Tab. 5.1. Wyniki badań masowych 9 sztuk amunicji PARA GECO: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Wyszczególnienie	Masa prochu [g]	Masa pocisku [g]
1	0,3279	7,9844
2	0,3259	7,9976
3	0,3273	7,9889
4	0,3287	7,9859
5	0,3275	7,9872
6	0,3285	7,9832
7	0,3253	7,9908
8	0,3224	7,9836
9	0,3248	7,9901
\bar{z}	0,3265	7,9880
$S(z)$	0,0021	0,0046

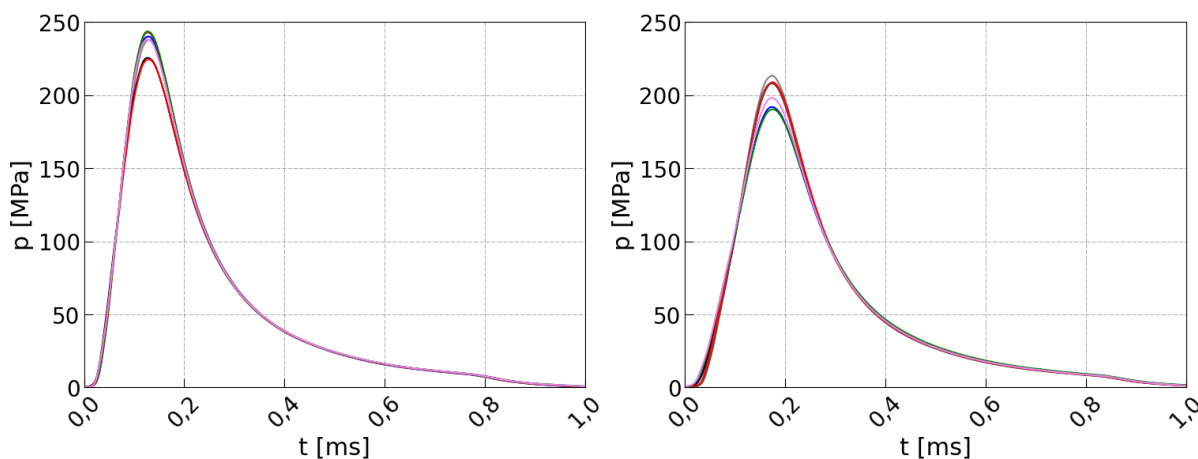
Analizując wyniki badań z tab. 5.1, stwierdzono dużą powtarzalność wykonania amunicji PARA GECO. Dotyczy to zarówno masy prochu – $0,3265 \pm 0,0021$ g, jak i masy pocisku – $7,9880 \pm 0,0046$ g. Wyniki badań potwierdziły możliwość wykorzystania pocisków pozyskanych z deeleboracji zakupionej amunicji do jej powtórnej elaboracji w celu przeprowadzenia badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu z OZPOG opisanych w rozdziale VII.

5.2. Badania charakterystyk balistycznych amunicji

Badaniom charakterystyk balistycznych, tj. $p(t)$ w łusce oraz V_2 , poddano amunicję PARA GECO, wykorzystywaną w dalszych badaniach doświadczalnych stanowiska laboratoryjnego. Ponadto, aby określić wpływ ładunku miotającego na działanie badanego układu (opisano w rozdziale VII), wykorzystując łuski i pociski pozyskane poprzez deelaborację fabrycznej amunicji PARA GECO, przygotowano naboje zaelaborowane prochami RS20 i D036. Naważki prochowe dobrano na podstawie zaleceń producentów amunicji PARA z pociskiem o masie 8 g. Dla prochu RS20 zastosowano naważkę 0,34 g, a dla prochu D036 – 0,38 g. W badaniach wykorzystano to samo stanowisko laboratoryjne i metodykę pomiarów, które przedstawiono w podrozdziale 2.1. Przebiegi $p(t)$ w łusce dla amunicji fabrycznej PARA GECO (7 prób) przedstawiono na rys. 5.1, natomiast przebiegi $p(t)$ w łusce dla amunicji elaborowanej w warunkach laboratoryjnych prochami D036 (7 prób) i RS20 (7 prób) – na rys. 5.2.



Rys. 5.1. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji PARA GECO



Rys. 5.2. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji elaborowanej prochem: D036 o masie 0,38 g (z lewej), RS20 o masie 0,34 g (z prawej)

Zbiorcze zestawienie uzyskanych podczas badań ciśnień maksymalnych p_{max} w łusce podczas strzału oraz V_2 przedstawiono w tab. 5.2.

Tab. 5.2. Zbiorcze zestawienie uzyskanych podczas badań ciśnień maksymalnych p_{max} w łusce podczas strzału oraz V_2 : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Wyszczególnienie	p_{max} [MPa]			V_2 [m/s]		
	Amunicja fabryczna	D036 0,38 g	RS20 0,34 g	Amunicja fabryczna	D036 0,38 g	RS20 0,34 g
1	190,74	237,95	213,36	360,2	371,4	359,1
2	191,65	240,18	191,92	359,9	372,8	352,0
3	186,51	225,52	208,11	358,0	367,2	361,2
4	179,16	224,57	208,92	353,2	367,2	361,2
5	185,33	242,89	208,42	358,1	375,9	356,7
6	182,79	243,63	190,27	357,2	376,2	353,4
7	190,60	238,12	198,22	360,6	372,9	354,3
\bar{z}	186,68	236,12	202,75	358,2	371,9	356,8
$S(z)$	4,66	7,87	9,17	2,5	3,7	3,8

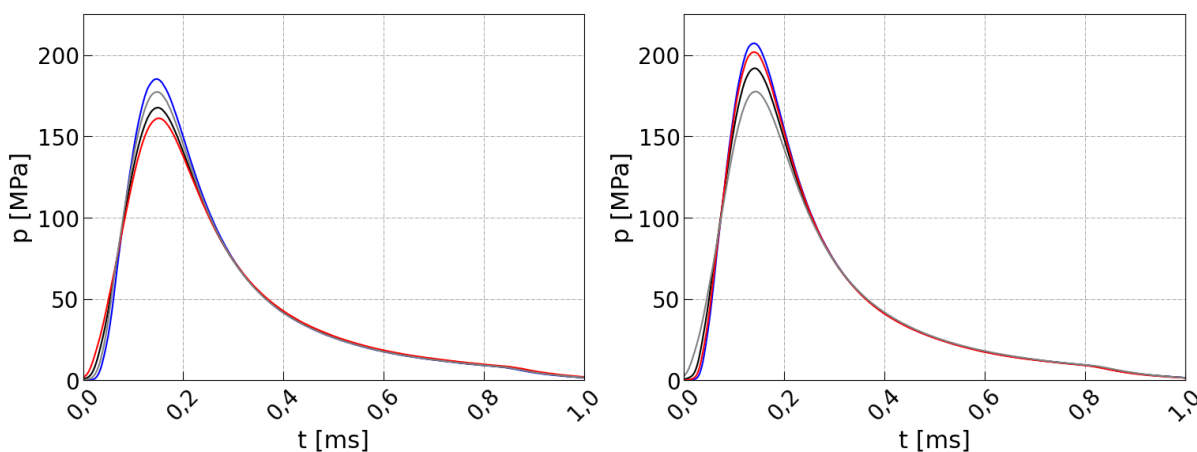
Na podstawie analizy uzyskanych wyników z badań (tab. 5.2) można stwierdzić, że parametry amunicji PARA GECO są powtarzalne zarówno w zakresie ciśnienia maksymalnego ($p_{max} = 186,68 \pm 4,66$ MPa), jak i w zakresie prędkości pocisku ($V_2 = 358,2 \pm 2,5$ m/s). Dla porównania wartości te dla amunicji PARA BLAZER wynoszą: $p_{max} = 218,24 \pm 3,42$ MPa i $V_2 = 369,9 \pm 2,0$ m/s, natomiast dla amunicji PARA S&B: $p_{max} = 248,19 \pm 5,55$ MPa i $V_2 = 396,1 \pm 1,5$ m/s. Stosunkowo niskie p_{max} w łusce amunicji PARA GECO, w porównaniu z amunicją PARA BLAZER i PARA S&B, powinno skutkować większą trwałością opracowanego stanowiska badawczego.

Amunicja elaborowana prochami D036 i RS20 charakteryzowała się większym rozrzutem uzyskiwanych wyników (bazując na wartościach odchyłeń standardowych próbki). Z tego powodu przeprowadzono badania powtarzalności reelaboracji (opisane w podrozdziale 5.3), które miały na celu sprawdzenie wpływu tego procesu na charakterystyki balistyczne amunicji, a także dodatkowe badania, mające na celu określenie parametrów balistycznych amunicji elaborowanej naważkami prochowymi innymi od zalecanych przez producentów.

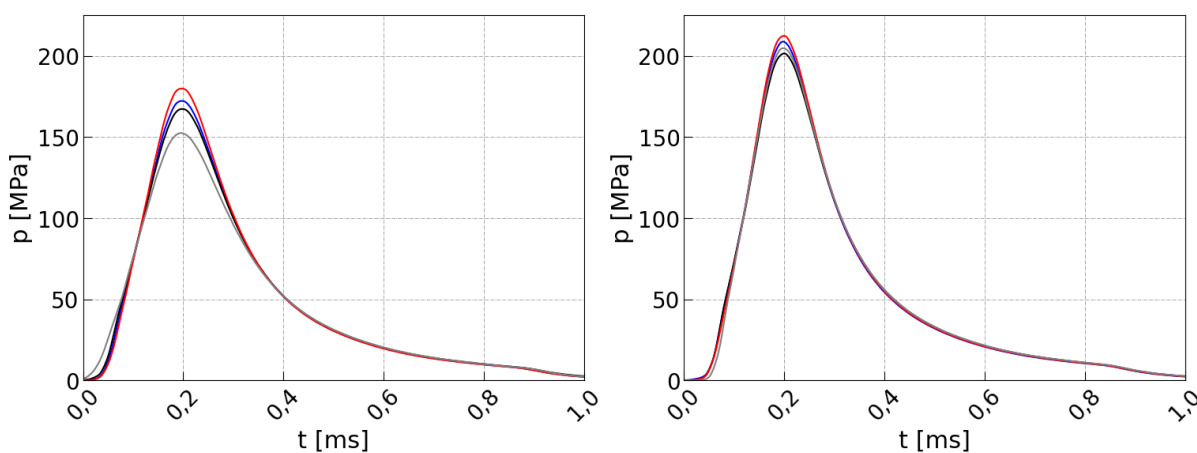
Powyższe badania przeprowadzono w analogiczny sposób, jak dla amunicji fabrycznej, ograniczając liczbę prób z 7 do 4 dla każdej konfiguracji. Przebadano amunicję elaborowaną następującymi prochami:

- D036 w naważce 0,34 g;
- D036 w naważce 0,36 g;
- RS20 w naważce 0,32 g;
- RS20 w naważce 0,36 g.

Przebiegi $p(t)$ w łusce dla amunicji elaborowanej prochem D036 (o masie 0,34 g i 0,36 g) przedstawiono na rys. 5.3, natomiast przebiegi $p(t)$ w łusce dla amunicji elaborowanej prochem RS20 (o masie 0,32 g i 0,36 g) – na rys. 5.4.



Rys. 5.3. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji elaborowanej prochem D036 o masie: 0,34 g (z lewej), 0,36 g (z prawej)



Rys. 5.4. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji elaborowanej prochem RS20 o masie: 0,32 g (z lewej), 0,36 g (z prawej)

Zbiorcze zestawienie p_{max} w łusce oraz V_2 dla amunicji elaborowanej w warunkach laboratoryjnych przedstawiono w tab. 5.3.

Tab. 5.3. Zbiorcze zestawienie p_{max} w łusce oraz V_2 dla amunicji elaborowanej w warunkach laboratoryjnych: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

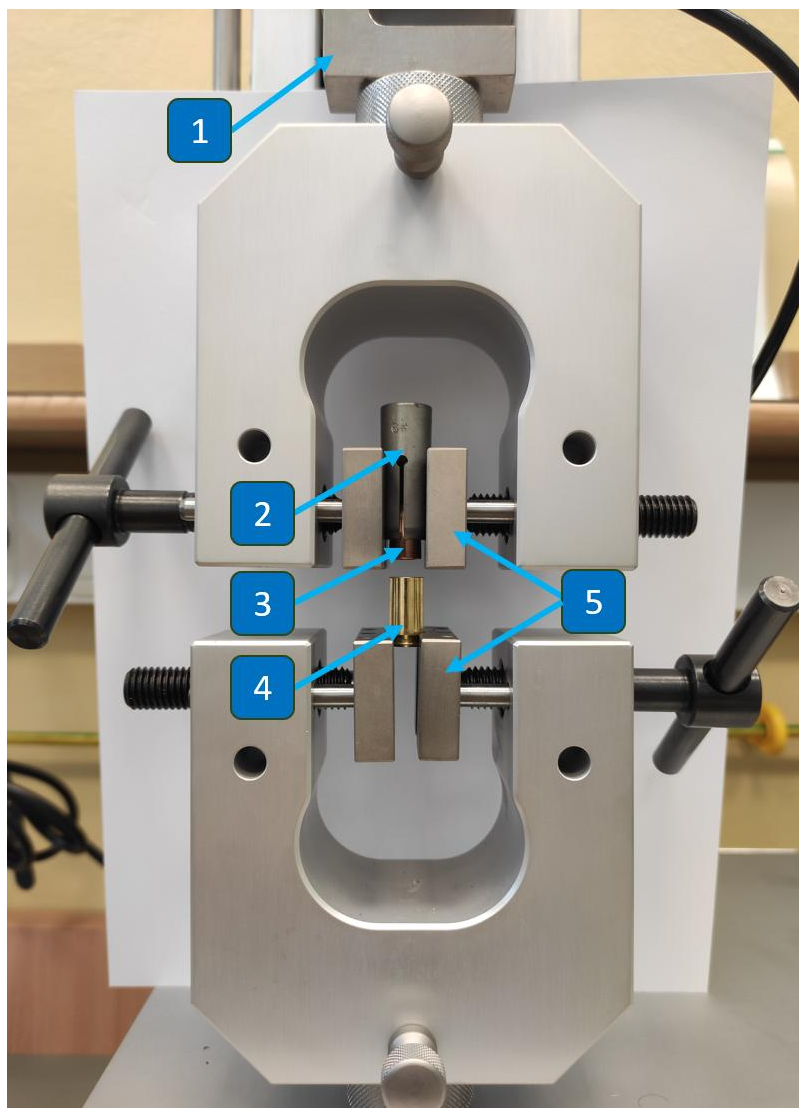
Wyszczególnienie	p_{max} [MPa]				V_2 [m/s]			
	D036 0,34 g	D036 0,36 g	RS20 0,32 g	RS20 0,36 g	D036 0,34 g	D036 0,36 g	RS20 0,32 g	RS20 0,36 g
1	185,31	207,26	172,34	208,88	337,7	353,2	340,6	366,0
2	167,66	191,90	167,35	201,61	329,9	347,6	336,0	363,4
3	161,15	201,85	179,96	212,41	327,4	351,9	343,2	367,3
4	177,38	177,61	152,52	204,79	334,2	342,0	330,2	358,4
\bar{z}	172,88	194,66	168,04	206,92	332,3	348,7	337,5	363,8
$S(z)$	10,64	13,02	11,57	4,72	2,5	3,7	3,8	4,6

Na podstawie analizy wyników badań (tab. 5.3) można stwierdzić, że amunicja elaborowana prochami D036 (w naważce 0,34 i 0,36 g) oraz RS20 (w naważce 0,32 g) charakteryzowała się mniejszą powtarzalnością wyników od fabrycznej amunicji GECO oraz amunicji elaborowanej zgodnie z zaleceniami producenta. Amunicja elaborowana prochem RS20 (w naważce 0,36 g) charakteryzowała się powtarzalnością zbliżoną do fabrycznej amunicji PARA GECO.

5.3. Badania siły rozcalania amunicji i powtarzalności reelaboracji

Kolejną wielkością zmierzoną podczas badań amunicji była siła potrzebna do rozcalenia pocisku i łuski podczas strzału. Poza pomiarem przebiegu tej siły sprawdzono jej wpływ na charakterystyki balistyczne amunicji. W tym celu, wykonano badania polegające na rozcaleniu fabrycznej amunicji PARA GECO na maszynie wytrzymałościowej Thümler Z3, wyposażonej w przetwornik siły. Przeprowadzono siedem pomiarów. Pocisk mocowano w górnych szczękach maszyny, a łuskę – w dolnych szczękach. W związku z tym, że szczęki maszyny wytrzymałościowej nie są przystosowane do rozcalania amunicji, której część pocisku wychodząca poza łuskę ma kształt ostrołukowy (czym charakteryzuje się większość amunicji pistoletowej), pojawiły się problemy z pewnym uchyceniem pocisku. Dlatego zmodyfikowano stanowisko pomiarowe, stosując – pomiędzy górną szczęką maszyny wytrzymałościowej a pociskiem – tuleję do rozcalania amunicji firmy Hornady. Tuleja

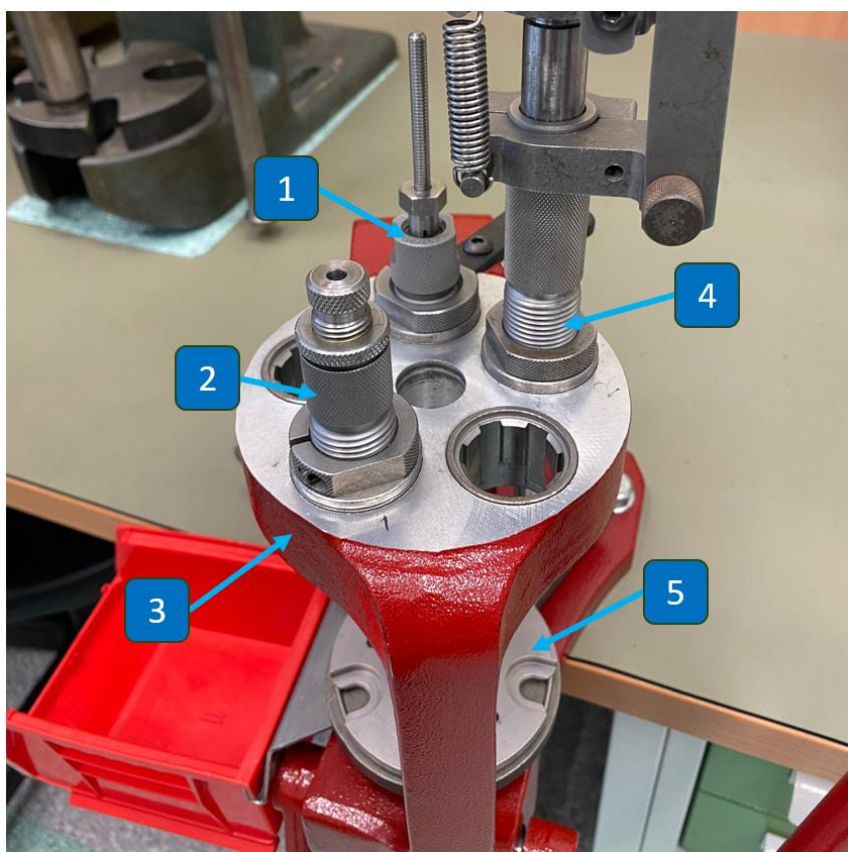
ta jest dopasowana do krzywizny pocisku i umożliwia jego pewny montaż przy użyciu stosunkowo niskiej, równomiernie rozłożonej siły nacisku (fot. 5.2).



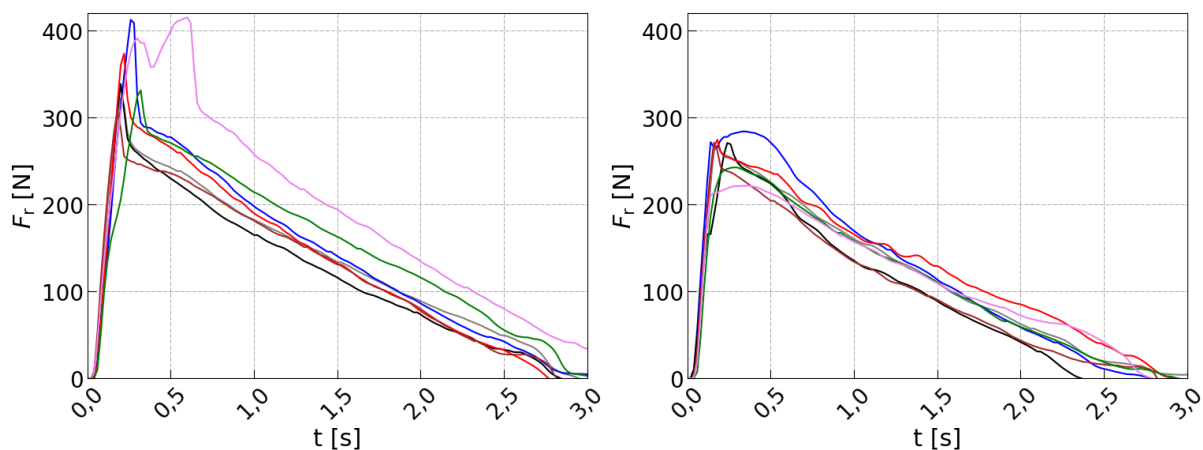
Fot. 5.2. Zamocowanie próbki w maszynie wytrzymałościowej Thümler Z3:
1 – przetwornik siły, 2 – tulejka do rozcalania amunicji, 3 – pocisk, 4 – łuska, 5 – szczęki

Po rozcaleniu amunicji przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych jej ponowną elaborację na prasie progresywnej z matrycami do elaboracji amunicji PARA firmy Hornady, przedstawionej na fot. 5.3.

Następnie, połowę partii zaelaborowanej amunicji poddano ponownym pomiarom siły rozcalania w funkcji czasu $F_r(t)$ na maszynie wytrzymałościowej, a drugą połowę partii wykorzystano w badaniach charakterystyk balistycznych. Przebiegi $F_r(t)$ dla amunicji fabrycznej (AF) oraz amunicji rozcalonej i ponownie zaelaborowanej (AR) przedstawiono na rys. 5.5.



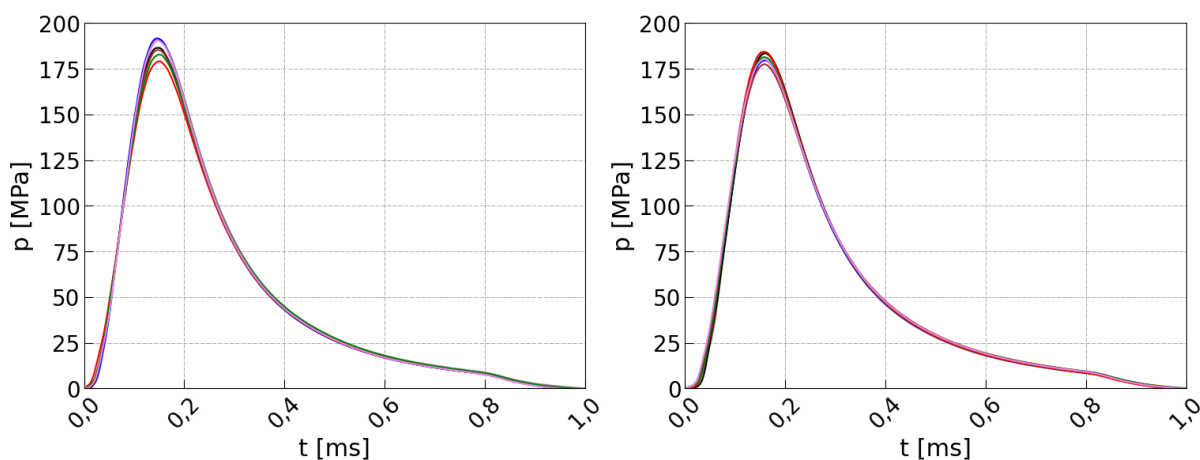
Fot. 5.3. Prasa progresywna z matrycami firmy Hornady: 1 – matryca do formowania łuski/ekstrakcji spłonki, 2 – matryca do osadzania pocisku w łusce, 3 – korpus prasy, 4 – matryca do zasypywania prochem, 5 – płytka adaptera do łusek



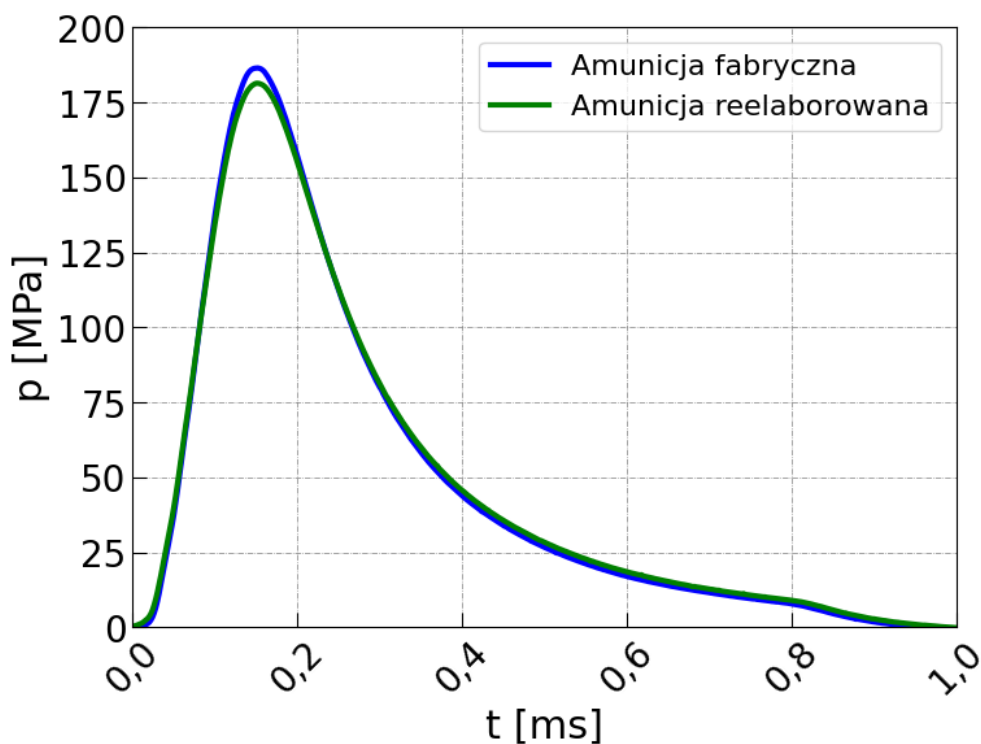
Rys. 5.5. Przebiegi siły rozczalania F_r w funkcji czasu t amunicji PARA GECO: fabrycznej (z lewej), ponownie zaelaborowanej (z prawej)

Badania charakterystyk balistycznych amunicji przeprowadzono analogicznie, jak w podrozdziale 5.2. Przebiegi ciśnienia występującego w łusce podczas strzału $p(t)$ przedstawiono na rys. 5.6, a porównanie reprezentatywnych (najbardziej zbliżonych

do wartości średniej z 7 prób) $p(t)$ w łusce dla amunicji fabrycznej oraz amunicji ponownie elaborowanej – na rys. 5.7.



Rys. 5.6. Przebiegi ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji PARA GECO: fabrycznej (z lewej), ponownie elaborowanej (z prawej)



Rys. 5.7. Porównanie reprezentatywnych przebiegów ciśnienia p w łusce w funkcji czasu t dla amunicji PARA GECO fabrycznej i reelaborowanej

Zbiorcze zestawienie maksymalnych wartości siły rozcalania F_{max} , p_{max} w łusce oraz V_2 dla amunicji fabrycznej i amunicji ponownie zaelaborowanej przedstawiono w tab. 5.4.

Tab. 5.4. Zbiornicze zestawienie F_{rmax} , p_{max} w łusce oraz V_2 dla fabrycznej i reelaborowanej amunicji PARA GECO: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, AF – amunicja fabryczna, AR – amunicja reelaborowana

Wyszczególnienie	F_{rmax} [N]		p_{max} [MPa]		V_2 [m/s]	
	AF	AR	AF	AR	AF	AR
1	311,1	282,3	190,74	183,80	360,2	355,1
2	404,9	258,0	191,65	179,53	359,9	353,2
3	338,1	288,6	186,51	183,45	358,0	355,4
4	381,4	271,9	179,16	184,36	353,2	358,4
5	317,4	270,4	185,33	177,51	358,1	354,1
6	323,7	242,3	182,79	181,39	357,2	355,3
7	414,9	253,4	190,6	180,23	360,6	356,9
\bar{z}	355,9	266,7	186,68	181,47	358,2	355,5
$S(z)$	43,5	16,4	4,66	2,54	2,5	1,7

Analizując wyniki badań (tab. 5.4) można stwierdzić, że amunicja fabryczna charakteryzowała się większym rozrzutem maksymalnej siły rozcalania ($F_{rmax} = 355,9 \pm 43,5$ N) w stosunku do amunicji reelaborowanej ($F_{rmax} = 266,7 \pm 16,4$ N). Pomimo dużych różnic w F_{rmax} pomiędzy fabryczną i reelaborowaną amunicją (po reelaboracji F_{rmax} zmniejszyła się o około 25%), p_{max} w łusce różniło się tylko o około 3%, a V_2 różniła się o mniej niż 1%. W celu sprawdzenia, czy uzyskana różnica w sile rozcalania miała istotny wpływ na p_{max} w łusce oraz V_2 , przeprowadzono test t-Studenta opisany w podrozdziale 2.2.

Sformułowano dwie hipotezy zerowe:

- wartości średnie są sobie równe, czyli F_{rmax} nie wpływa w sposób istotny na p_{max} w łusce podczas strzału,
- wartości średnie są sobie równe, czyli F_{rmax} nie wpływa w sposób istotny na V_2 .

Współczynnik T_{kr} dla rozpatrywanych przypadków wyniósł $T_{kr} = 2,18$. Dla porównania wyników pomiarów maksymalnego ciśnienia w łusce podczas strzału, współczynnik T wynosił $T = 2,41$, co oznacza, że T należy do przedziału krytycznego. W związku z tym hipoteza zerowa nie jest prawdziwa i nie można jednoznacznie stwierdzić, że F_{rmax} nie wpływa w sposób istotny na p_{max} w łusce podczas strzału. Współczynnik T – dla porównania wyników pomiarów V_2 – wyniósł $T = 2,18$, co oznacza, że wartość współczynnika T znajduje się na granicy przedziału

krytycznego. Można więc stwierdzić, że hipoteza zerowa nie jest prawdziwa. Nie można więc jednoznacznie stwierdzić, że F_{rmax} nie wpływa w sposób istotny na V_2 .

5.4. Podsumowanie rozdziału V

Na podstawie analizy wyników badań amunicji przeprowadzonych w rozdziale piątym, można stwierdzić, że:

- parametry masowe amunicji docelowej PARA GECO charakteryzują się dużą powtarzalnością, świadcząc o starannym wykonaniu jej komponentów. Umożliwiło to wykorzystanie tych komponentów do wytworzenia amunicji elaborowanej innymi prochami;
- amunicja PARA GECO charakteryzuje się nie gorszą powtarzalnością w zakresie p_{max} w łusce i V_2 w porównaniu do amunicji producentów BLAZER i S&B, którą poddano badaniom w podrozdziale 2.1;
- wykorzystana metoda elaboracji amunicji skutkowałą zwiększeniem powtarzalności maksymalnej siły rozczalania amunicji oraz zmniejszeniem jej wartości w porównaniu do amunicji fabrycznej PARA GECO;
- analiza statystyczna wykazała, że zmiana siły rozczalania naboju może wpływać na wartości ciśnienia maksymalnego w łusce oraz prędkości pocisku na torze lotu;
- zastosowana metoda pomiaru $F_r(t)$, ze względu na niską prędkość rozczalania, skutkuje tym, że pomiar ma charakter quasistatyczny (podczas strzału rozczalenie naboju ma charakter dynamiczny). W związku z tym, należałoby przeprowadzić dodatkowe badania w celu stwierdzenia, czy przyjęta metoda pomiaru siły rozczalania jest adekwatna.

Strona celowo zostawiona pusta

ROZDZIAŁ VI

ZASADNICZE BADANIA AUTOMATYKI BRONI DZIAŁAJĄCEJ NA ZASADZIE OZPOG NA STANOWISKU LABORATORYJNYM

W celu wykonania badań na stanowisku laboratoryjnym do doświadczalnego badania układu automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG opracowano „Program badań” wraz z metodykami, który przedstawiono w **załączniku nr 2** do niniejszej rozprawy. Program ten wykonano, bazując na załączniku informacyjnym A normy obronnej NO-06-A105:2021 [100]. Zawiera on m.in. cztery metodyki, które szczegółowo opisują sposób prowadzenia badań. Są to:

- Metodyka nr 1. Testowanie stanowiska laboratoryjnego (podrozdział 4.4);
- Metodyka nr 2. Zasadnicze badania stanowiska laboratoryjnego (rozdział VI)
- Metodyka nr 3. Określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego (rozdział VII);
- Metodyka nr 4. Określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego (rozdział VIII).

Podczas prowadzenia analizy wyników badań stosowano unormowane oznaczenia parametrów wejściowych oraz ich wartości. Wykaz parametrów wejściowych obiektu z przypisanymi im oznaczeniami unormowanymi i zakresem wartości przyjętych do badań przedstawiono w tab. 6.1.

Tab. 6.1. Wykaz parametrów wejściowych obiektu z przypisanymi im oznaczeniami unormowanymi i zakresem wartości przyjętym do badań

Oznaczenie	Nazwa parametru	J.m.	Wartość		
			-1	0	1
X_1	Odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy	mm	21,5	36,5	51,5
X_2	Średnica otworu gazowego	mm	1,0	1,4	1,8
X_3	Masa zespołu odrzucanego	g	360	390	420
X_4	Średnica tłoczyska	mm	4	5	6
X_5	Długość tłoczyska	mm	91	96	101

Badania zasadnicze stanowiska laboratoryjnego przeprowadzono zgodnie z Metodyką nr 2 „Programu badań” (załącznik nr 2). Do przeprowadzenia badań zastosowano plan Bi, składający się z jądra planu oraz punktów gwiazdnych. Jądro planu stanowił plan frakcyjny dwuwartościowy (2^{5-1}), a wartości parametru X_5 obliczono na podstawie relacji generującej (6.1) dla kontrastu $l = 1$:

$$X_5 = X_1X_2X_3X_4 \quad (6.1)$$

Ramię gwiazdne planu było równe 1, w związku z czym wartości unormowane wielkości wejściowych dla punktów gwiazdnych wynosiły: -1 oraz 1. Tak opracowany plan doświadczenia składa się z 26 konfiguracji. Do planu dodano konfiguracje K27, K28 i K29, w których układ opóźnienia gazowego został wyłączony (przez zaślepienie otworów gazowych), a zmieniano tylko parametr X_3 (masę zespołu odrzucanego). Obiekt badań w tych konfiguracjach działał analogicznie do zamka swobodnego. Pomiary dla tych konfiguracji wykonano w celach porównawczych, a uzyskane wyniki nie podlegały analizie statystycznej. Plan doświadczenia dla wielkości unormowanych przedstawiono w tab. 6.2.

Tab. 6.2. Plan doświadczenia dla wielkości unormowanych (Metodyka nr 2 „Programu badań”): X_1 – odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy, X_2 – średnica otworu gazowego, X_3 – masa zespołu odrzucanego, X_4 – średnica tłoczyska, X_5 – długość tłoczyska

Numer konfiguracji	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
K1	-1	-1	-1	-1	1
K2	1	-1	-1	-1	-1
K3	-1	1	-1	-1	-1
K4	1	1	-1	-1	1
K5	-1	-1	1	-1	-1
K6	1	-1	1	-1	1
K7	-1	1	1	-1	1
K8	1	1	1	-1	-1
K9	-1	-1	-1	1	-1
K10	1	-1	-1	1	1
K11	-1	1	-1	1	1
K12	1	1	-1	1	-1
K13	-1	-1	1	1	1
K14	1	-1	1	1	-1

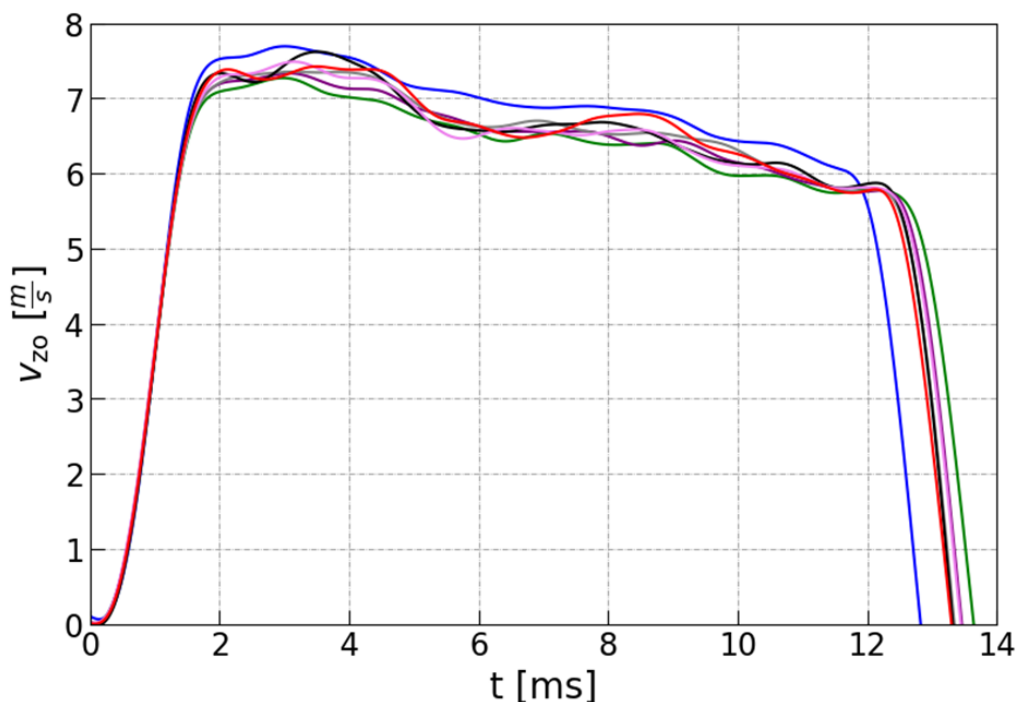
Tab. 6.2. c.d. Plan doświadczenia dla wielkości nieunormowanych (Metodyka nr 2 „Programu badań”): X_1 – odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy, X_2 – średnica otworu gazowego, X_3 – masa zespołu odrzucanego, X_4 – średnica tłoczyska, X_5 – długość tłoczyska

Numer konfiguracji	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
K15	-1	1	1	1	-1
K16	1	1	1	1	1
K17	-1	0	0	0	0
K18	1	0	0	0	0
K19	0	-1	0	0	0
K20	0	1	0	0	0
K21	0	0	-1	0	0
K22	0	0	1	0	0
K23	0	0	0	-1	0
K24	0	0	0	1	0
K25	0	0	0	0	-1
K26	0	0	0	0	1
K27	-	-	-1	1	1
K28	-	-	0	1	1
K29	-	-	1	1	1

Zgodnie z Metodyką nr 2 „Programu badań” badano trzy wielkości wyjściowe obiektu badań: prędkość zespołu odrzucanego v_{zo} , ciśnienie w komorze gazowej p_{kg} oraz prędkość pocisku w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy V_2 . Dla każdej z tych wielkości przeprowadzono analizę statystyczną bazującą na metodach teorii eksperymentu (głównie RSM), a następnie przeprowadzono analizę merytoryczną. Ponadto, wykonano analizę niedokładności pomiarów oraz analizę istotności współczynników funkcji aproksymującej funkcję obiektu.

6.1. Badania prędkości zespołu odrzucanego

Badania v_{zo} na stanowisku laboratoryjnym polegały na rejestracji przemieszczenia zespołu odrzucanego w funkcji czasu $x_{zo}(t)$ za pomocą laserowego czujnika przemieszczenia. Przebiegi $x_{zo}(t)$ wygładzono z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu Loess [101], [102], który wykonuje również obliczenia pierwszej pochodnej po czasie. W ten sposób uzyskano przebiegi $v_{zo}(t)$. Przykładowe przebiegi $v_{zo}(t)$ dla 7 prób wykonanych w konfiguracji K6 (planu doświadczenia – tab. 6.2) stanowiska laboratoryjnego (konfiguracja wybrana losowo) przedstawiono na rys. 6.1.

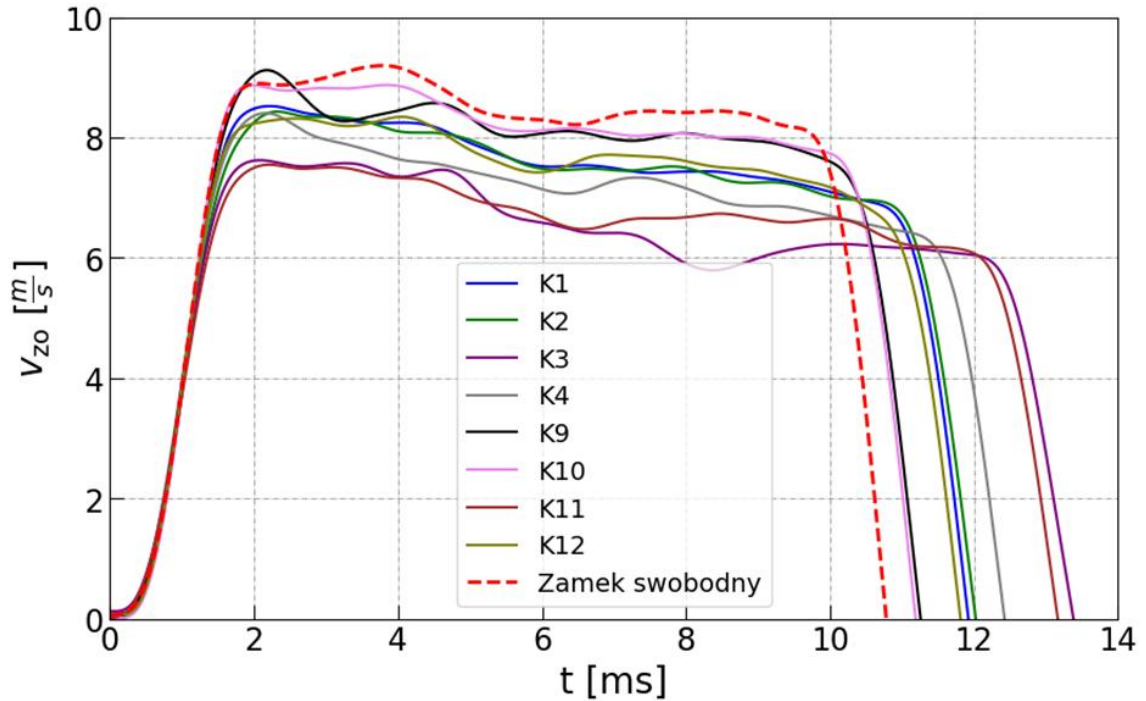


Rys. 6.1. Przykładowe przebiegi prędkości zespołu odrzucanego V_{zo} w funkcji czasu t dla 7 prób wykonanych w konfiguracji K6 stanowiska laboratoryjnego

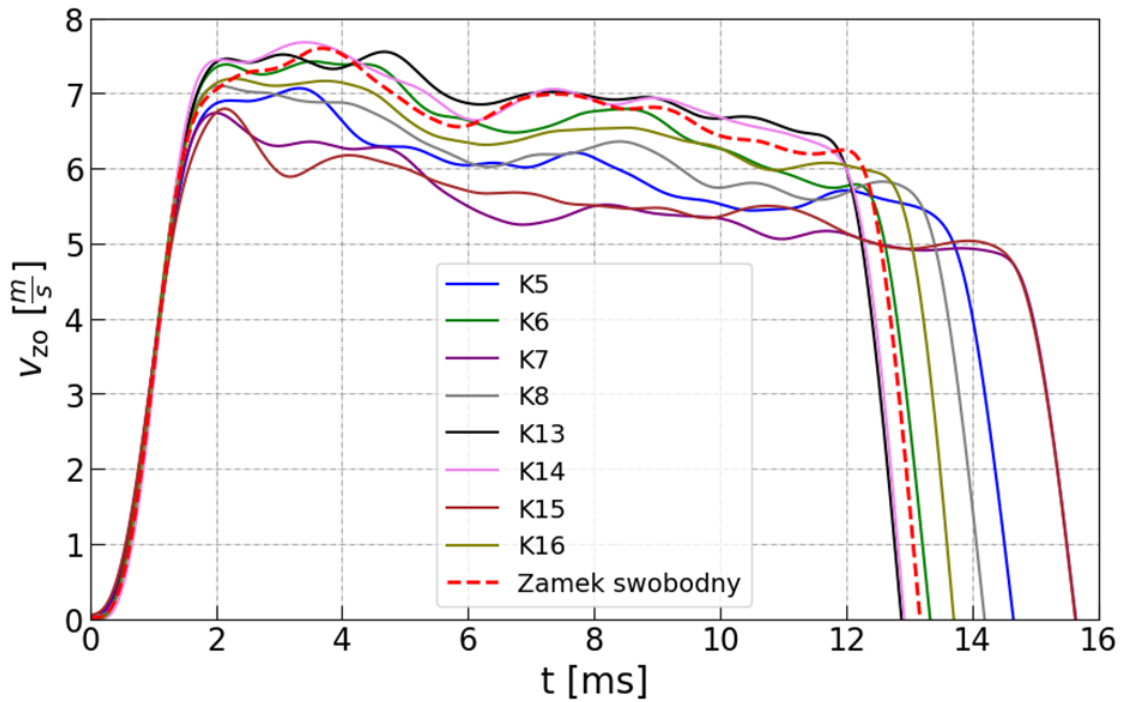
Z kolei na rys. 6.2 i 6.3 przedstawiono przebiegi $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji jądra planu doświadczenia (konfiguracje K1÷K16 – tab. 6.2). Bazując na wynikach badań symulacyjnych [2], w których masa zespołu odrzucanego m_{zo} miała największy wpływ na jego prędkość podczas strzału, w celu zwiększenia czytelności rysunków, zestawiono przebiegi dla konfiguracji obiektu, w których masa ta była stała. Dlatego też, rys. 6.2 przedstawia przebiegi $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji K1÷K4 i K9÷K12, w których $m_{zo} = 360$ g, natomiast rys. 6.3 – przebiegi $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji K5÷K8 i K13÷K16, w których $m_{zo} = 420$ g. Na obu rysunkach przedstawiono po jednym, najbardziej zbliżonym do wartości średniej przebiegu $v_{zo}(t)$ dla każdej konfiguracji. Ponadto, w celach porównawczych, na obu rysunkach naniesiono czerwoną, przerywaną linią przebiegi $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji z wyłączonym układem opóźnienia gazodynamicznego i tożsamą do pozostałych konfiguracji m_{zo} .

Przebiegi $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji obiektu z punktów gwiazdnych planu doświadczenia przedstawiono na rys. 6.4. Na rysunkach zaprezentowano odpowiedź obiektu na zmianę jednego parametru w zakresie skrajnych wartości, przy czym konfiguracje K17 i K18 dotyczą zmiany położenia otworu gazowego, a konfiguracje K19 i K20 – zmiany średnicy otworu gazowego. Do zmiany średnicy tłoczyska i jego długości odnoszą się odpowiednio konfiguracje K23 i K24 oraz K25 i K26.

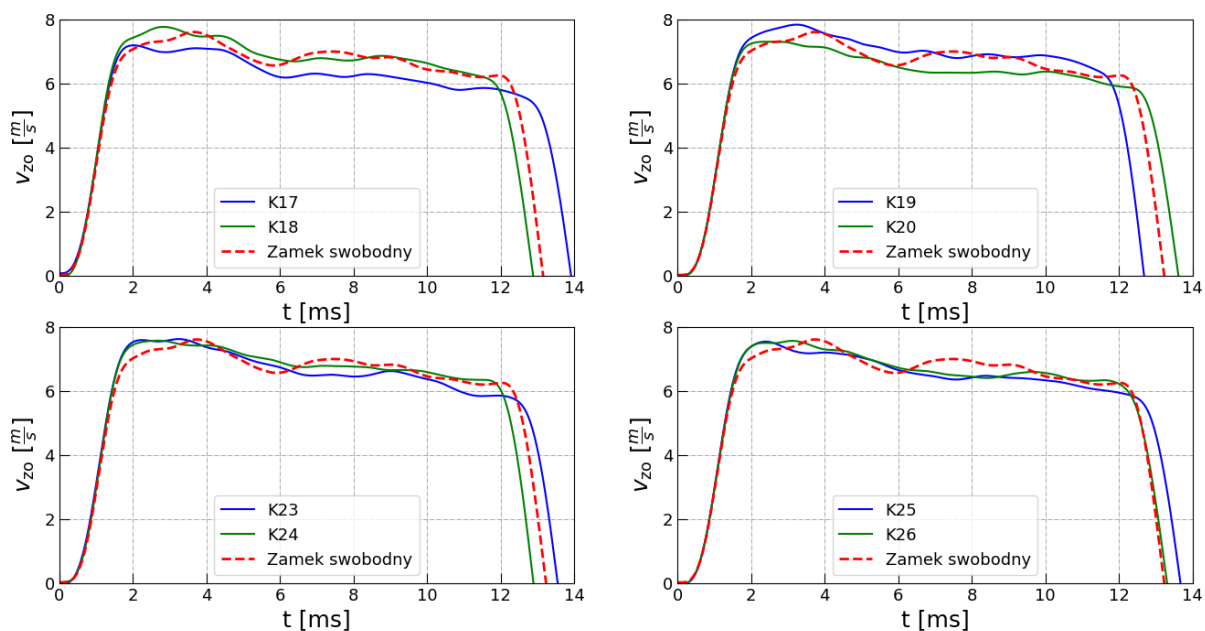
Ponadto, w celach porównawczych, na rysunkach naniesiono czerwoną, przerywaną linią przebieg $v_{zo}(t)$ dla konfiguracji z wyłączonym układem opóźnienia gazowego i tożsamą do pozostałych konfiguracji m_{zo} .



Rys. 6.2. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, w których $m_{zo} = 360$ g

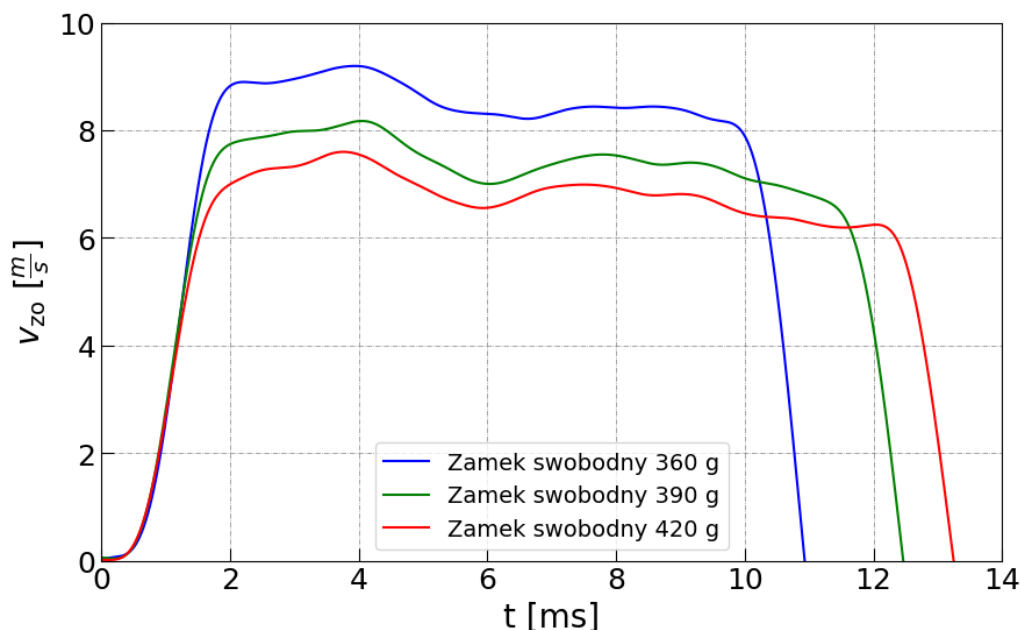


Rys. 6.3. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, w których $m_{zo} = 420$ g



Rys. 6.4. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t dla punktów gwiazdnych planu doświadczenia, przy czym konfiguracje K17 i K18 odnoszą się do zmiany położenia otworu gazowego, K19 i K20 – średnicy otworu gazowego, K23 i K24 – średnicy tłoczyska, a K25 i K26 – długości tłoczyska

Przebiegi $v_{zo}(t)$ z wyłączonym układem gazowym (zaślepionym otworem gazowym) dla różnych m_{zo} przedstawiono na rys. 6.5. Z analizy tego rysunku oraz tab. 6.3 wynika, że prędkości zespołu odrzucanego dla jego poszczególnych mas kształtowały się na poziomie: $v_{zomax} = 9,20 \pm 0,40$ m/s dla $m_{zo} = 360$ g; $8,18 \pm 0,18$ m/s dla $m_{zo} = 390$ g oraz $7,63 \pm 0,19$ m/s dla $m_{zo} = 420$ g.



Rys. 6.5. Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t z wyłączonym układem gazowym (zamek swobodny) dla różnych mas zespołu odrzucanego

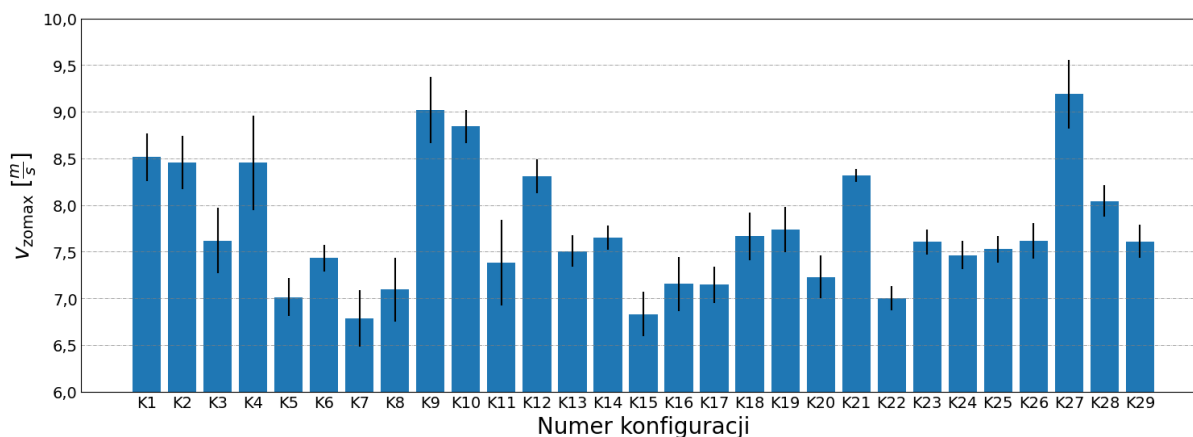
6.1.1. Analiza statystyczna wyników badań prędkości zespołu odrzucanego

Maksymalne wartości prędkości zespołu odrzucanego v_{zomax} dla wszystkich wykonanych pomiarów na stanowisku badawczym w każdej konfiguracji (zgodnie z planem doświadczenia – tab. 6.2) wraz z obliczonymi: średnią arytmetyczną \bar{z} i odchyleniem standardowym próbki $S(z)$ zestawiono w tab. 6.3.

Tab. 6.3. Maksymalne wartości prędkości zespołu odrzucanego v_{zomax} dla wszystkich wykonanych pomiarów na stanowisku badawczym w każdej konfiguracji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	v_{zomax} [m/s]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K1	8,74	8,83	8,70	8,52	8,26	8,52	8,06	8,52	0,27
K2	8,68	7,92	8,59	8,29	8,43	8,56	8,88	8,48	0,31
K3	8,27	7,62	7,71	7,46	7,91	7,05	7,76	7,68	0,38
K4	9,41	8,31	8,94	8,41	8,00	8,34	7,83	8,46	0,55
K5	6,60	7,15	7,12	7,07	7,08	7,11	7,33	7,07	0,22
K6	7,69	7,27	7,33	7,35	7,62	7,49	7,42	7,45	0,16
K7	7,29	6,99	6,34	6,74	6,54	6,58	6,99	6,78	0,33
K8	6,29	7,22	7,34	7,37	7,23	7,13	7,10	7,10	0,37
K9	8,84	8,84	8,69	9,84	9,12	8,99	9,20	9,07	0,38
K10	9,13	9,00	8,86	8,87	8,93	8,51	8,79	8,87	0,19
K11	8,18	7,13	7,77	6,86	7,61	6,86	7,55	7,42	0,50
K12	8,34	8,26	8,39	8,62	8,44	8,00	8,49	8,36	0,20
K13	7,82	7,55	7,65	7,53	7,45	7,81	7,33	7,59	0,18
K14	7,49	7,64	7,76	7,57	7,68	7,93	7,68	7,68	0,14
K15	7,25	6,95	7,03	6,71	6,62	6,51	6,79	6,84	0,26
K16	7,63	7,19	7,15	7,29	6,58	7,25	7,26	7,19	0,31
K17	7,36	7,00	7,10	6,84	7,43	7,28	7,18	7,17	0,21
K18	7,98	7,53	7,76	8,14	7,80	7,34	7,58	7,73	0,27
K19	7,97	8,21	7,85	7,83	7,59	7,62	7,44	7,79	0,26
K20	7,70	7,04	6,93	7,40	7,38	7,32	7,30	7,30	0,25
K21	8,39	8,24	8,44	8,41	8,34	8,30	8,28	8,34	0,07
K22	7,33	7,14	6,87	7,06	7,05	7,02	7,05	7,07	0,14
K23	7,76	7,61	7,73	7,57	7,39	7,47	7,76	7,61	0,15
K24	7,56	7,37	7,37	7,29	7,61	7,74	7,39	7,48	0,16
K25	7,61	7,43	7,78	7,53	7,70	7,51	7,33	7,56	0,16
K26	7,79	7,73	7,54	7,56	7,75	7,85	7,26	7,64	0,20
K27	9,80	9,19	9,46	9,27	8,54	9,25	8,92	9,20	0,40
K28	8,34	7,98	7,95	8,18	7,79	8,17	8,12	8,18	0,18
K29	7,72	7,69	7,80	7,47	7,83	7,60	7,29	7,63	0,19

Z kolei na rys. 6.6 przedstawiono średnie v_{zomax} z zaznaczonymi na słupkach (pionowymi kreskami) odchyleniami standardowymi próbki dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego.



Rys. 6.6. Średnie v_{zomax} z zaznaczonymi na słupkach odchyleniami standardowymi próbki dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego

Na podstawie wyników zawartych w tab. 6.3 obliczono ze wzorów (6.2÷6.5): parametr t_s , błąd graniczny pomiaru e_1 , błąd graniczny wartości średniej e oraz wariancję niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń) $S^2(z)$:

- parametr t_s (6.2):

$$t_s = \frac{z - z_{ieksp}}{S(z)} \quad (6.2)$$

gdzie:

- z – wartość uzyskana doświadczalnie (pojedyncza próbka),
- z_{ieksp} – średnia wartość z próbek (pomiarów) dla danej konfiguracji układu,

- błąd graniczny pomiaru (6.3):

$$e_1 = t_\alpha S(z) \quad (6.3)$$

gdzie:

- t_α – wartość zmiennej t_s dla danego poziomu ufności,

- błąd graniczny wartości średniej (6.4):

$$e = t_\alpha S(\bar{z}) = t_\alpha S(z) / \sqrt{r} \quad (6.4)$$

gdzie:

- r – liczba powtórzeń pomiarów,

- wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń) (6.5):

$$S^2(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S^2(z)_i \quad (6.5)$$

gdzie:

n – liczba konfiguracji.

Wyniki obliczeń wskaźników statystycznych dla v_{zomax} przedstawiono w tab. 6.4.

Tab. 6.4. Obliczone wskaźniki statystyczne dla v_{zomax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
K1	8,52	0,27	0,67	0,25	0,08
K2	8,48	0,31	0,75	0,28	0,09
K3	7,68	0,38	0,93	0,35	0,14
K4	8,46	0,55	1,34	0,50	0,30
K5	7,07	0,22	0,55	0,21	0,05
K6	7,45	0,16	0,38	0,14	0,02
K7	6,78	0,33	0,80	0,30	0,11
K8	7,10	0,37	0,90	0,34	0,14
K9	9,07	0,38	0,94	0,35	0,15
K10	8,87	0,19	0,47	0,18	0,04
K11	7,42	0,50	1,21	0,46	0,25
K12	8,36	0,20	0,48	0,18	0,04
K13	7,59	0,18	0,44	0,17	0,03
K14	7,68	0,14	0,34	0,13	0,02
K15	6,84	0,26	0,63	0,24	0,07
K16	7,19	0,31	0,77	0,29	0,10
K17	7,17	0,21	0,51	0,19	0,04
K18	7,73	0,27	0,67	0,25	0,08
K19	7,79	0,26	0,64	0,24	0,07
K20	7,30	0,25	0,62	0,23	0,06
K21	8,34	0,07	0,18	0,07	0,01
K22	7,07	0,14	0,34	0,13	0,02
K23	7,61	0,15	0,36	0,13	0,02
K24	7,48	0,16	0,40	0,15	0,03
K25	7,56	0,16	0,38	0,14	0,02
K26	7,64	0,20	0,50	0,19	0,04

Wyniki zawarte w tab. 6.4 były podstawą do obliczenia ze wzorów (6.6÷6.8) parametrów statystycznych obiektu, tj.: odchylenia standardowego $S(z)$ oraz błędu granicznego z rozkładu t-Studenta e :

- odchylenie standardowe obiektu (6.6):

$$S(z) = \sqrt{S^2(z)} \quad (6.6)$$

- błąd graniczny obiektu obliczany z rozkładu t-Studenta (6.7):

$$e = t_{\alpha, f} S(z) \quad (6.7)$$

gdzie:

f – częstość dla stopni swobody wynoszącej $r-1$, obliczana ze wzoru (6.8):

$$f = n(r - 1) \quad (6.8)$$

Obliczone parametry statystyczne obiektu dla v_{zomax} przedstawiono w tab. 6.5.

Tab. 6.5. Obliczone parametry statystyczne obiektu dla v_{zomax}

Parametr	Symbol	Wartość
Liczba powtórzeń	r	7
Liczba stopni swobody	$r-1$	6
Liczba konfiguracji	n	26
Częstość	f	156
Poziom istotności	α	0,05
Wariancja obiektu	$S^2(z)$	0,077
Odchylenie standardowe obiektu	$S(z)$	0,277
Błąd graniczny obiektu	e	0,547

Dalsza analiza statyczna obejmowała: aproksymację funkcji obiektu, sprawdzenie adekwatności tej funkcji oraz weryfikację istotności jej współczynników.

6.1.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności

Jednym ze sposobów wyznaczenia wartości współczynników aproksymacji funkcji obiektu jest rozwiązanie klasycznego układu równań liniowych względem tych współczynników – tzw. metoda interpolacyjna. Metoda jest łatwa do implementacji, jednakże daje ograniczone możliwości w zakresie analizy statystycznej. Dlatego też wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów, polegającą na minimalizacji sumy kwadratów różnic pomiędzy wartościami uzyskanymi z funkcji aproksymującej $f_A(X)$, a wartościami aproksymowanej funkcji z_i . W zastosowanej metodzie minimalizacji podlegała suma kwadratów odchyleń (6.9):

$$I_{min} = \sum_{i=1}^n [\bar{z}_i - f_A(X_i)]^2 \quad (6.9)$$

gdzie:

- I_{min} – minimalizowana funkcja celu,
- n – liczba konfiguracji układu,
- \bar{z}_i – wartości funkcji aproksymowanej,
- $f_A(X_i)$ – wartości funkcji aproksymującej.

Metoda najmniejszych kwadratów sprowadza się do przyrównania do zera pochodnych cząstkowych funkcji $I_{min}(b_0, b_1, \dots)$ w celu znalezienia minimum funkcji. W efekcie uzyskuje się układ równań liniowych względem nieznanymi wartości współczynników wielomianu b_i . W celu uproszczenia procesu obliczeń i analiz statystycznych, w metodach teorii eksperymentu wykorzystuje się unormowane wartości wielkości wejściowych.

Wykorzystując środowiska obliczeniowe MS Excel i MATLAB, przeprowadzono proces aproksymacji przy użyciu rachunku macierzowego, formułując kolejno następujące macierze:

- macierz planu doświadczenia X , tj. macierz o liczbie wierszy równej liczbie układów wartości wielkości wejściowych i liczbie kolumn równej liczbie nieznanymi współczynników; elementy macierzy równe są wartościom funkcji stojących przy danych współczynnikach dla danego układu wartości wielkości wejściowych;
- transponowaną macierz planu doświadczenia X^T ;
- macierz informacyjną $M = X^T X$, będącą iloczynem macierzowym transponowanej macierzy planu doświadczenia i macierzy planu doświadczenia;
- odwrotną macierz informacyjną M^{-1} ;
- macierz wartości aproksymowanej funkcji (lub wartości średnich) Z , tj. jednokolumnową macierz wartości funkcji dla poszczególnych układów wartości wielkości wejściowych;
- macierz kolumnową $C = X^T Z$, tj. jednokolumnową macierz będącą iloczynem transponowanej macierzy planu doświadczenia i macierzy wartości aproksymowanej funkcji (lub wartości średnich);

- macierz $B = M^{-1}C$, tj. jednokolumnową macierz współczynników (gdzie pierwszym elementem jest wyraz wolny b_0).

Uzyskane w toku obliczeń wartości macierzy B stanowią współczynniki funkcji aproksymującej.

Współczynniki funkcji aproksymującej funkcję obiektu wraz z odpowiadającymi im parametrami dla v_{zomax} przedstawiono w tab. 6.6.

Tab. 6.6. Współczynniki funkcji aproksymującej funkcję obiektu wraz z odpowiadającymi im parametrami dla v_{zomax} : POWA – parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA	Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b_0	7,515	-	b_{11}	0,135	X_1X_2
b_1	0,177	X_1	b_{12}	-0,021	X_1X_3
b_2	-0,299	X_2	b_{13}	-0,017	X_1X_4
b_3	-0,580	X_3	b_{14}	0,044	X_1X_5
b_4	0,075	X_4	b_{15}	0,071	X_2X_3
b_5	0,006	X_5	b_{16}	-0,119	X_2X_4
b_6	-0,064	X_1^2	b_{17}	-0,016	X_2X_5
b_7	0,028	X_2^2	b_{18}	0,020	X_3X_4
b_8	0,194	X_3^2	b_{19}	0,042	X_3X_5
b_9	0,031	X_4^2	b_{20}	-0,111	X_4X_5
b_{10}	0,082	X_5^2			

Funkcja aproksymująca funkcję obiektu dla v_{zomax} wyraża się wzorem (6.10):

$$\begin{aligned}
 f_A(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = & \\
 = & 7,515 + 0,177X_1 - 0,299X_2 - 0,580X_3 + 0,075X_4 + 0,006X_5 \\
 & - 0,064X_1^2 + 0,028X_2^2 + 0,194X_3^2 + 0,031X_4^2 + 0,082X_5^2 \\
 & + 0,135X_1X_2 - 0,021X_1X_3 - 0,017X_1X_4 + 0,044X_1X_5 \\
 & + 0,071X_2X_3 - 0,119X_2X_4 - 0,016X_2X_5 \\
 & + 0,020X_3X_4 + 0,042X_3X_5 - 0,111X_4X_5
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Sprawdzenie adekwatności aproksymacji funkcji obiektu przeprowadzono wykorzystując trzy metody: test Fishera-Snedecora [96], współczynnik korelacji wielokrotnej oraz założenie dopuszczalnej wartości błędu aproksymacji i porównanie oszacowanego błędu aproksymacji z tą wartością.

Pierwsza metoda – test Fishera-Snedecora – polegała na porównaniu obliczonej wartości zmiennej losowej F z wartością krytyczną F_{kr} . Jeżeli spełniony jest warunek $F \leq F_{kr}$ można stwierdzić, że funkcja jest adekwatna. W celu obliczenia wartości zmiennej losowej F wyznaczono wariancję adekwatności $S^2(z)_a$ oraz wariancję niedokładności pomiaru $S^2(z)$. Wariancję adekwatności obliczono ze wzoru (6.11):

$$S^2(z)_a = \frac{r}{f_a} \sum_{i=1}^n (z_{ieksp} - z_{iaproks})^2 \quad (6.11)$$

gdzie:

- r – liczba powtórzeń,
- z_{ieksp} – wartość określona eksperymentalnie,
- $z_{iaproks}$ – wartość obliczona przy użyciu funkcji obiektu,
- f_a – częstość obliczana ze wzoru (6.12):

$$f_a = n - N_b - 1 \quad (6.12)$$

gdzie:

- n – liczba konfiguracji,
- N_b – liczba współczynników funkcji obiektu (bez wyrazu wolnego b_0).

Zmienną losową F definiuje się jako iloraz wariancji adekwatności i wariancji niedokładności pomiaru zgodnie ze wzorem (6.13):

$$F = \frac{S^2(z)_a}{S^2(z)} \quad (6.13)$$

Wartość krytyczną F_{kr} odczytywano z tabel dla rozkładu Snedecora dla przyjętych wartości: poziomu istotności α oraz częstości f_a i f (6.14):

$$F_{kr} = F_{\alpha, f, f_a} \quad (6.14)$$

Wariancja adekwatności $S^2(z)_a$ w rozpatrywanym przypadku dla częstości $f_a = 5$ wyniosła 0,121, a wariancja niedokładności pomiaru $S^2(z) = 0,077$. Na podstawie tych dwóch wariancji obliczono zmienną losową F , która wyniosła 1,567. Wartość krytyczna F_{kr} dla przyjętego stopnia istotności równego 0,05 wyniosła 2,242. Aby określić funkcję jako adekwatną, wartość zmiennej losowej F nie mogła być większa niż wartość krytyczna F_{kr} , co w tym przypadku zostało spełnione. Na podstawie testu Fishera-Snedecora stwierdzono, że funkcja jest adekwatna.

Druga metoda polegała na obliczeniu współczynnika korelacji wielokrotnej, który był obliczany ze wzoru: (6.15):

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{i_{eksp}} - \bar{z})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{i_{aprosks}} - \bar{z})^2}} \quad (6.15)$$

gdzie:

- $z_{i_{eksp}}$ – średnia wartość pomiaru uzyskana dla danej konfiguracji,
- $z_{i_{aprosks}}$ – wartość obliczona przy użyciu funkcji aproksymującej dla danej konfiguracji,
- \bar{z} – średnia wartość ze średnich zmierzonych wartości dla wszystkich konfiguracji obliczana ze wzoru (6.16):

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i_{eksp}}}{n} \quad (6.16)$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej może przyjmować wartości od 0 do 1. Im wartość ta jest bardziej zbliżona do 1, tym korelacja funkcji aproksymującej z pomiarami jest lepsza. W różnych dziedzinach nauki przyjmuje się odmiennie minimalną, wymaganą wartość współczynnika, powyżej której funkcję ocenia się jako adekwatną. W niniejszej analizie przyjęto, że wartość współczynnika korelacji wielokrotnej powyżej 0,98 będzie oznaczała, że funkcja jest adekwatna.

Dla analizowanej aproksymacji funkcji obiektu współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R = 0,996$, co świadczy o dobrym dopasowaniu funkcji aproksymującej do wyników badań eksperymentalnych. Na podstawie współczynnika korelacji wielokrotnej można stwierdzić z dużym prawdopodobieństwem, że funkcja ta jest adekwatna.

Trzecia metoda polegała na założeniu dopuszczalnej wartości błędu aproksymacji i porównaniu oszacowanego błędu aproksymacji z tą wartością. Według niej aproksymacja jest adekwatna, jeżeli błąd aproksymacji nie przekracza założonej wartości. Dopuszczalna wartość błędu aproksymacji może być tożsama z odchyleniem standardowym bądź błędem granicznym obiektu. Błąd aproksymacji może być definiowany na różne sposoby. W związku z tym, że wykorzystana procedura aproksymacji funkcji obiektu bazowała na metodzie najmniejszych kwadratów, jako

oszacowanie błędu aproksymacji przyjęto błąd średniokwadratowy aproksymacji obliczony ze wzoru (6.17):

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{ieksp} - z_{iaproks})^2}{n}} \quad (6.17)$$

Obliczony błąd średniokwadratowy aproksymacji $M = 0,058$ był znacznie niższy od odchylenia standardowego obiektu $S(z) = 0,277$. Obliczono również maksymalny błąd bezwzględny aproksymacji Δz_{max} ze wzoru (6.18) i porównano go z błędem granicznym obiektu.

$$\Delta z_{max} = \max_{i=1,n} |z_{ieksp} - z_{iaproks}| \quad (6.18)$$

Maksymalny błąd bezwzględny aproksymacji $\Delta z_{max} = 0,140$ jest niższy od błędu granicznego obiektu równego $e = 0,548$. Biorąc pod uwagę dwa powyższe porównania wartości można stwierdzić, że aproksymacja funkcji obiektu jest adekwatna.

6.1.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu

Ocena istotności wartości współczynników ma na celu eliminację tych współczynników, które wpływają na wartości funkcji aproksymującej na poziomie zaburzeń losowych. Często stosowana procedura weryfikacji polega na przeprowadzeniu testu statystycznego (np. t-Studenta), który wskazuje istotne współczynniki funkcji aproksymującej. Następnie, powtórnie wyznacza się współczynniki (uproszczonej) funkcji aproksymującej funkcję obiektu (uwzględniając tylko współczynniki istotne) oraz bada się adekwatność tej funkcji. Potwierdzenie adekwatności funkcji jest wyznacznikiem poprawnie wytypowanych współczynników, które w istotny sposób nie wpływają na wielkości wyjściowe obiektu.

W opracowaniach [103] i [104] przeprowadzono ocenę istotności współczynników funkcji aproksymującej (wzór 6.10) z wykorzystaniem testu t-Studenta. Analiza wykazała, że tylko trzy współczynniki – poza wyrazem wolnym – spełniają warunek istotności dla poziomu ufności równego 0,95. Dodatkowo, w uproszczonej funkcji uwzględniono dwa współczynniki odnoszące się do wyrazów opisujących współdziałanie parametrów, dla których poziom istotności był niższy od 0,1.

Sprawdzenie adekwatności uproszczonej funkcji aproksymującej funkcję obiektu dało wynik negatywny, co było podstawą do przeprowadzenia analizy zastosowanych metod.

Ocenę istotności współczynników bazującą na teście t-Studenta opracowano dla przypadków regresji liniowej. W opracowaniu [103] podjęto próbę uogólnienia tej metody, co również nie przyniosło oczekiwanych rezultatów. Zaproponowano więc metodę oceny istotności współczynników opartą o analizę ich wartości w odniesieniu do poziomu zaburzeń losowych. Ocenę odchylenia standardowego współczynników stojących przy wyrazach liniowych S_{bi} wykonano z wykorzystaniem wzoru (6.19):

$$S_{bi} = \sqrt{S^2 M_{ii}^{-1}} \quad (6.19)$$

gdzie:

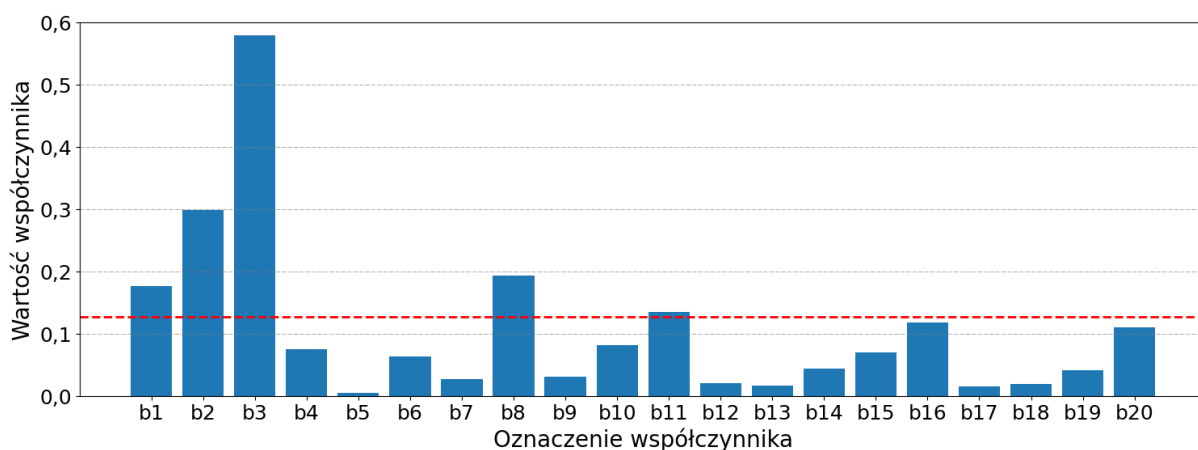
- S^2 – wariancja współczynników stojących przy wyrazach liniowych,
- M_{ii}^{-1} – element diagonalny odwrotnej macierzy informacyjnej.

Wszystkie współczynniki odnoszące się do wyrazów liniowych opisano takim samym odchyleniem standardowym, które może być podstawą do oceny wpływu zaburzeń losowych na pozostałe współczynniki. Aby określić ten wpływ uwzględniono również losowość, co zrealizowano – podobnie jak w przypadku testu t-Studenta – poprzez pomnożenie odchylenia standardowego współczynników przez krytyczną wartość zmiennej¹⁵ $t_{\alpha,f}$. Opisaną metodę stosowano do weryfikacji istotności współczynników funkcji obiektu w dalszej części niniejszej pracy.

Z wykorzystaniem opisanej powyżej metody, przeprowadzono weryfikację istotności współczynników funkcji obiektu dla v_{zomax} , jako wielkości wyjściowej obiektu. Odchylenie standardowe współczynników wyniosło $S_{bi} = 0,065$, a krytyczna wartość zmiennej $t_{\alpha,f}$ dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i częstości $f = 156$ wyniosła $t_{\alpha,f} = 1,975$. Iloczyn odchylenia standardowego współczynników i wartości krytycznej $t_{\alpha,f}$, wynoszący 0,128, przyjęto jako miarę wpływu zaburzeń losowych na wartości współczynników oraz porównano z tymi wartościami. Na rys. 6.7 przedstawiono bezwzględne wartości współczynników funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla

¹⁵ Zmienna odczytywana dla rozkładu t-Studenta dla określonego poziomu istotności α i częstości f .

v_{zomax} . Czerwoną, przerywaną linią zaznaczono oszacowany wpływ zaburzeń losowych na wartości współczynników. Na tej podstawie stwierdzono, że w funkcji aproksymującej należy uwzględnić współczynniki b_1 , b_2 , b_3 , b_8 i b_{11} . Ponadto, z uwagi na bliskość wartości granicznej uwzględniono również współczynniki b_{16} i b_{20} .



Rys. 6.7. Bezwzględne wartości współczynników funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla v_{zomax}

W tab. 6.7 przedstawiono współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla v_{zomax} . W porównaniu z nieuproszczoną funkcją zmianie uległy wartości wyrazu wolnego oraz współczynnika związanego z nieliniowym oddziaływaniem zmiany masy zespołu odrzucanego X_3^2 na obiekt badań.

Tab. 6.7. Współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla v_{zomax} : POWA – parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b_0	7,534	-
b_1	0,177	X_1
b_2	-0,299	X_2
b_3	-0,580	X_3
b_8	0,243	X_3^2
b_{11}	0,135	X_1X_2
b_{16}	-0,119	X_2X_4
b_{20}	-0,111	X_4X_5

Uproszczona funkcja aproksymująca funkcję obiektu dla v_{zomax} ma postać (6.20):

$$\begin{aligned} f_A(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = \\ = 7,534 + 0,177X_1 - 0,299X_2 - 0,580X_3 + 0,243X_3^2 + 0,135X_1X_2 \\ - 0,119X_2X_4 - 0,111X_4X_5 \end{aligned} \quad (6.20)$$

W celu weryfikacji, czy odrzucone współczynniki były nieistotne sprawdzono adekwatność uproszczonej funkcji aproksymującej (wzór 6.20). W pierwszej kolejności przeprowadzono test Fishera-Snedecora. Zmienna losowa F w tym przypadku wyniosła 1,93, a wartość krytyczna – F_{kr} dla stopnia istotności $\alpha = 0,05$ wyniosła 1,67. Wartość krytyczna jest mniejsza od zmiennej losowej. Na podstawie przeprowadzonego testu stwierdzono, że funkcja nie jest adekwatna.

Następnie obliczono współczynnik korelacji wielokrotnej, który wyniósł $R = 0,98$, co świadczy o stosunkowo dobrym dopasowaniu funkcji aproksymującej do wyników eksperymentu.

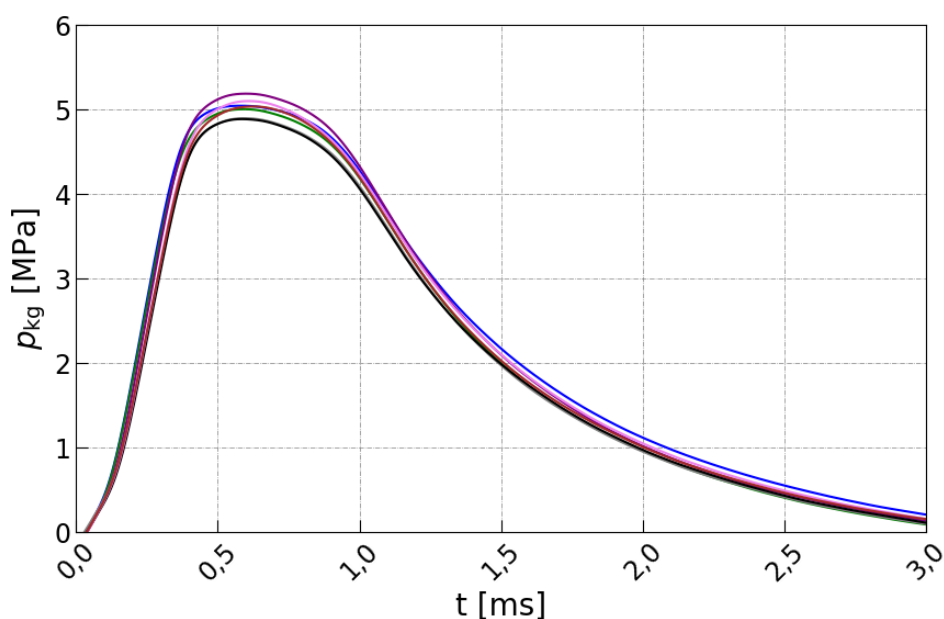
Obliczono również błąd średniokwadratowy aproksymacji $M = 0,121$, którego wartość była niższa od odchylenia standardowego obiektu $S(z) = 0,277$. Maksymalny błąd względny aproksymacji $\Delta z_{max} = 0,260$ był również niższy od błędu granicznego obiektu $e = 0,548$. Na tej podstawie można stwierdzić, że aproksymacja funkcji obiektu jest adekwatna.

Wyniki badania adekwatności funkcji aproksymującej, przedstawione powyżej nie są jednoznaczne. Chociaż przeprowadzony test Fishera-Snedecora wykazał nieadekwatność funkcji aproksymującej, to należy zaznaczyć, że został on adaptowany z metod regresji liniowej i może nie być odpowiedni do badania adekwatności funkcji nieliniowych. Współczynnik korelacji wielokrotnej jest miarą dopasowania, którą trudno jednoznacznie zinterpretować. Nie ma określonych sztywno przedziałów liczbowych, w jakich musi znaleźć się wartość współczynnika, aby uznać, że funkcja jest adekwatna. Co więcej, w zależności od dziedziny prowadzonych badań i mierzonych wielkości akceptowalna wartość tego współczynnika może być różna. Najbardziej uniwersalną metodą badania adekwatności funkcji nieliniowej wydaje się być porównanie dopuszczalnej wartości błędu aproksymacji i oszacowanego błędu aproksymacji. Metoda ta jest stosunkowo prosta, nie bazuje na kryteriach stosowanych w regresji liniowej i jednoznacznie

określa, czy funkcja aproksymująca jest adekwatna. W dalszej części dysertacji badania adekwatności aproksymacji funkcji obiektu będą wykonywane tylko tą metodą.

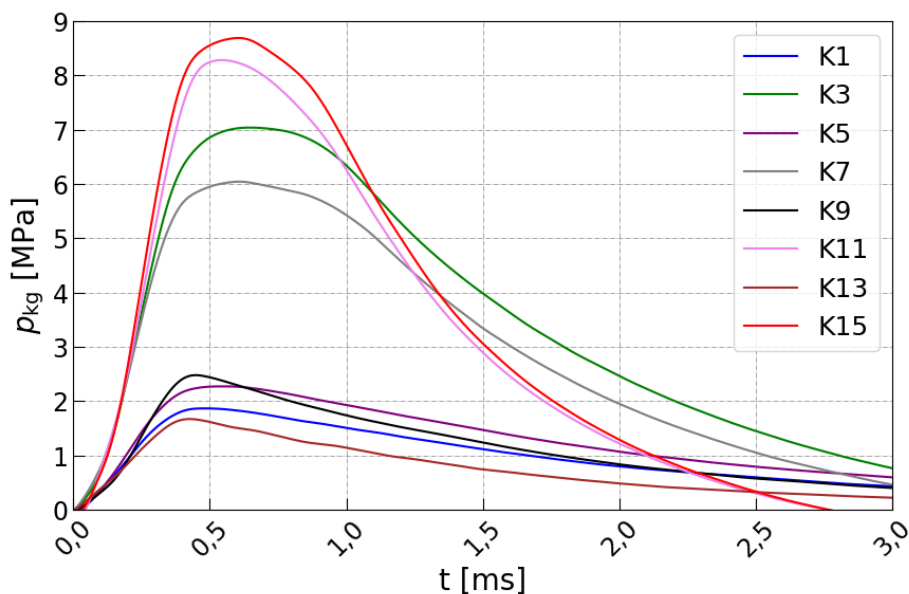
6.2. Badania ciśnienia w komorze gazowej

Badania ciśnienia w komorze gazowej p_{kg} przeprowadzono zgodnie z Metodyką nr 2 „Programu badań”. Ciśnienie to było rejestrowane za pomocą piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia, który montowano w gniazdach komory gazowej. Przywoływane poniżej konfiguracje wynikają z planu doświadczenia przedstawionego w tab. 6.2. Przykładowe przebiegi ciśnienia w komorze gazowej w funkcji czasu $p_{kg}(t)$ dla 7 prób, wykonanych na stanowisku laboratoryjnym w konfiguracji K12 (konfiguracja wybrana losowo) przedstawiono na rys. 6.8.

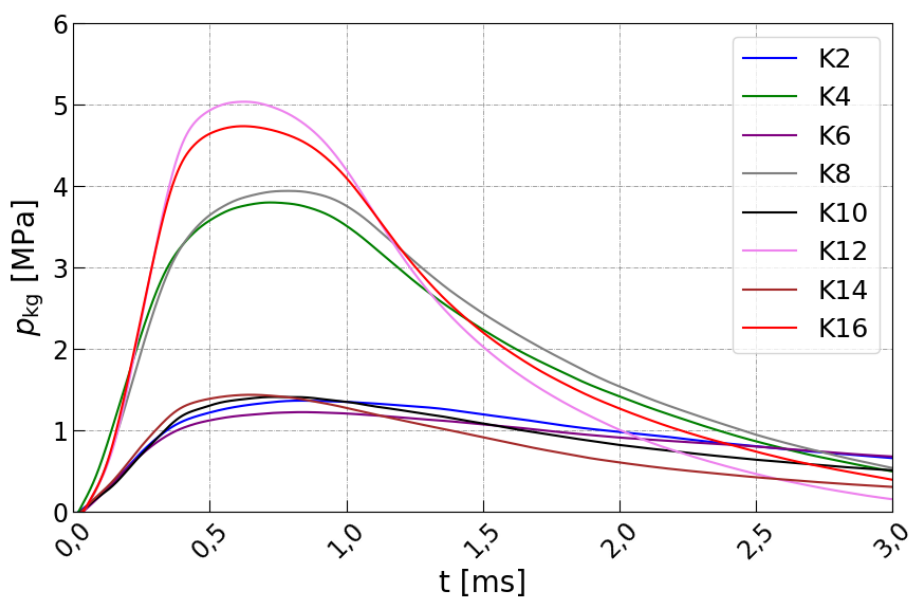


Rys. 6.8. Przykładowe przebiegi ciśnienia w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla konfiguracji K12 stanowiska laboratoryjnego

Z kolei przebiegi $p_{kg}(t)$ na stanowisku laboratoryjnym w konfiguracjach od K1 do K16 (jądro planu doświadczenia z tab. 6.2) przedstawiono na rys. 6.9 i 6.10. W celu zwiększenia czytelności obu rysunków, konfiguracje podzielono na podstawie odległości otworu gazowego od płasku wlotowego lufy. Dlatego też, rys. 6.9 przedstawia przebiegi $p_{kg}(t)$ dla konfiguracji, w których odległość otworu gazowego od wlotu lufy wynosi 21,5 mm, natomiast rys. 6.10 – dla konfiguracji, w których odległość otworu gazowego od wlotu lufy wynosi 51,5 mm.

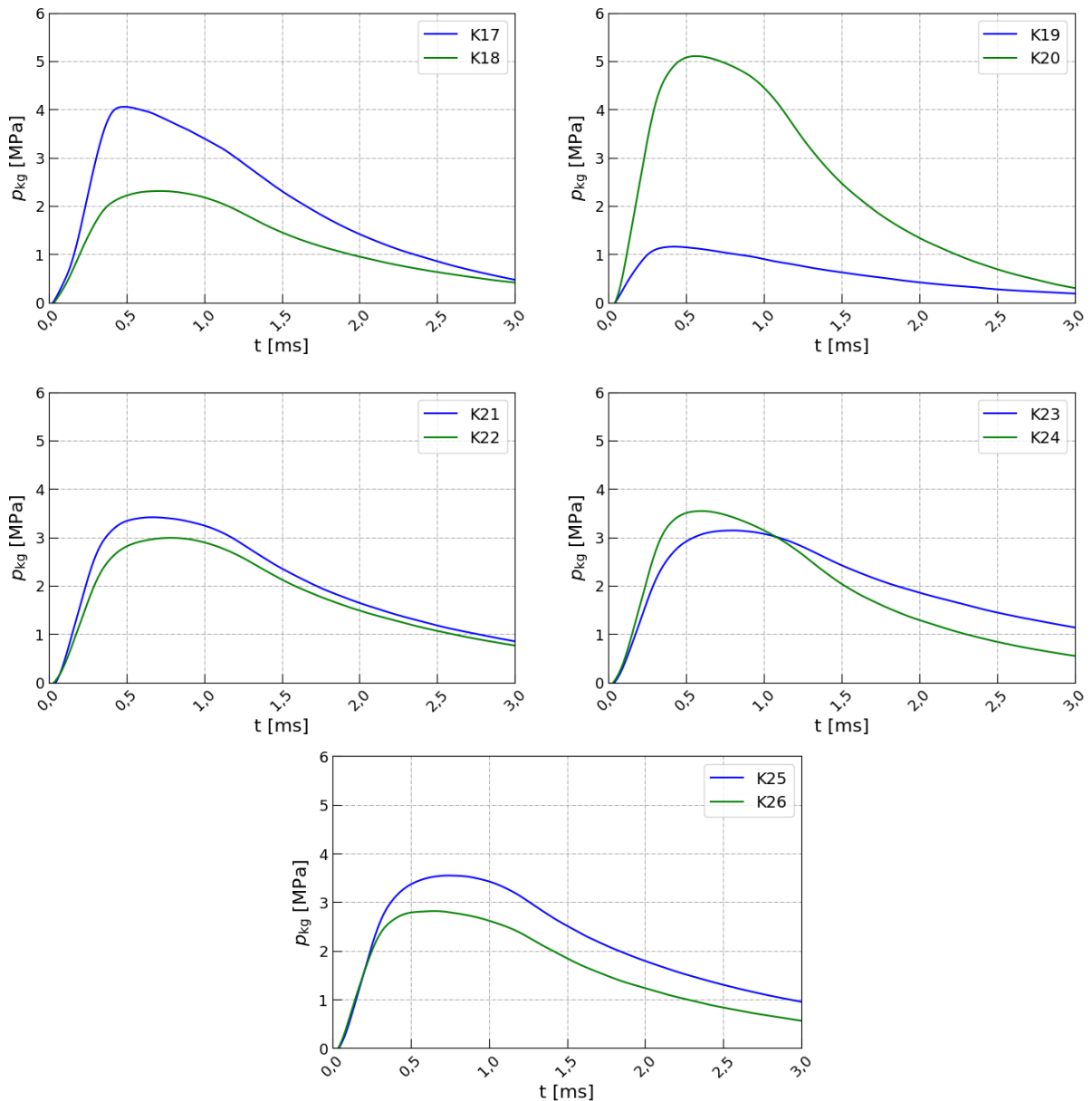


Rys. 6.9. Przebiegi ciśnienia w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, w których odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy wynosiła 21,5 mm



Rys. 6.10. Przebiegi ciśnienia w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, w których odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy wynosiła 51,5 mm

Na rys. 6.11 przedstawiono przebiegi $p_{kg}(t)$ dla punktów gwiazdnych planu doświadczenia, które ilustrują reakcję obiektu na zmianę jednego parametru w zakresie jego skrajnych wartości. Konfiguracje K17 i K18 odnoszą się do zmiany położenia otworu gazowego, K19 i K20 – do zmiany średnicy tego otworu, K21 i K22 – do zmiany masy zespołu odrzucanego, K23 i K24 – do zmiany średnicy tłoczyska, a K25 i K26 – do zmiany długości tłoczyska.



Rys. 6.11. Przebiegi ciśnienia w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla punktów gwiazdnych planu doświadczenia, przy czym konfiguracje K17 i K18 odnoszą się do zmiany położenia otworu gazowego, K19 i K20 – średnicy otworu gazowego, K21 i K22 – masy zespołu odrzucanego, K23 i K24 – średnicy tłoczyska, a K25 i K26 – długości tłoczyska

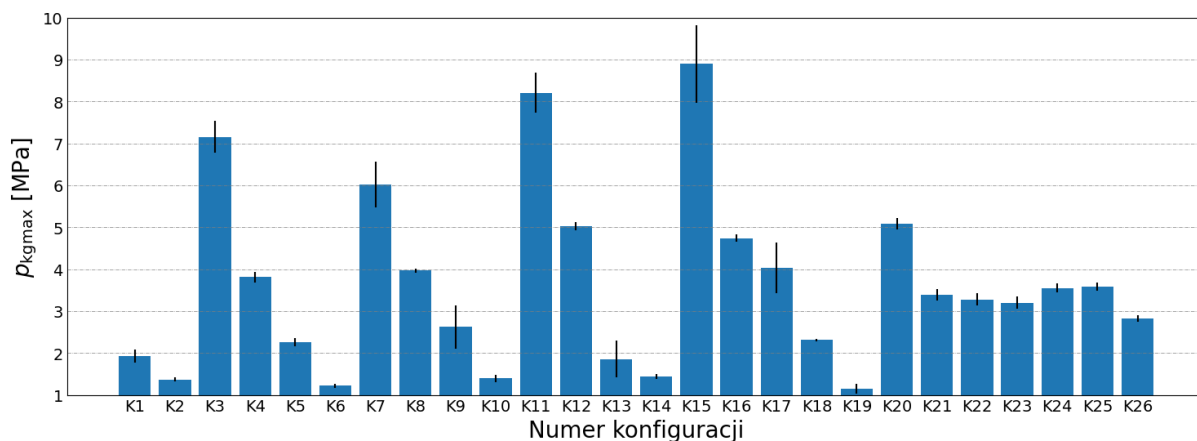
6.2.1. Analiza statystyczna wyników badań ciśnienia w komorze gazowej

Maksymalne wartości ciśnienia w komorze gazowej p_{kgmax} dla wszystkich wykonanych pomiarów w każdej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla Metodyki nr 2 „Programu badań” przedstawiono w tab. 6.8. W tabeli tej umieszczono również obliczoną średnią arytmetyczną \bar{z} oraz odchylenie standardowe próbki $S(z)$ dla każdej z konfiguracji.

Tab. 6.8. Maksymalne wartości ciśnienia w komorze gazowej p_{kgmax} dla wszystkich wykonanych pomiarów na stanowisku badawczym w każdej konfiguracji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	p_{kgmax} [MPa]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K1	2,13	1,87	1,87	2,05	1,69	2,11	1,84	1,94	0,17
K2	1,44	1,35	1,39	1,27	1,41	1,34	1,36	1,37	0,06
K3	7,39	7,86	7,30	7,01	6,58	6,91	7,04	7,16	0,41
K4	4,04	3,93	3,80	3,66	3,77	3,80	3,69	3,81	0,13
K5	2,30	2,18	2,27	2,26	2,46	2,23	2,15	2,27	0,10
K6	1,34	1,17	1,19	1,19	1,22	1,21	1,24	1,22	0,06
K7	5,15	6,14	6,93	6,04	6,62	5,74	5,84	6,07	0,58
K8	3,91	4,06	3,93	4,01	4,00	3,90	3,94	3,96	0,06
K9	2,20	3,13	3,15	3,29	2,35	1,88	2,48	2,64	0,55
K10	1,24	1,29	1,41	1,46	1,43	1,51	1,45	1,40	0,10
K11	8,31	8,66	8,38	8,28	8,28	8,50	7,09	8,21	0,51
K12	5,04	5,00	5,19	4,90	4,89	5,10	5,03	5,02	0,11
K13	2,32	1,49	1,67	1,44	2,14	1,39	2,58	1,86	0,48
K14	1,56	1,45	1,40	1,44	1,44	1,40	1,39	1,44	0,06
K15	8,03	10,10	8,69	9,14	8,93	10,26	7,54	8,95	1,00
K16	4,71	4,82	4,73	4,92	4,66	4,64	4,69	4,74	0,10
K17	3,85	4,96	4,05	3,58	3,46	3,56	4,99	4,07	0,65
K18	2,35	2,36	2,29	2,34	2,31	2,28	2,29	2,32	0,03
K19	1,27	1,15	1,11	1,17	0,93	1,10	1,31	1,15	0,12
K20	5,05	4,89	5,10	5,22	4,94	5,13	5,31	5,09	0,15
K21	3,61	3,53	3,41	3,24	3,44	3,22	3,32	3,40	0,15
K22	3,44	3,37	3,13	3,37	3,35	2,99	3,30	3,28	0,16
K23	3,32	3,06	3,36	3,29	2,93	3,32	3,14	3,20	0,16
K24	3,71	3,70	3,53	3,56	3,54	3,43	3,38	3,55	0,12
K25	3,66	3,48	3,46	3,77	3,53	3,61	3,54	3,58	0,11
K26	2,95	2,79	2,81	2,88	2,78	2,83	2,67	2,82	0,09

Zestawienie średnich p_{kgmax} dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 6.12. Na słupkach naniesiono odchylenia standardowe próbki.



Rys. 6.12. Zestawienie średnich maksymalnych ciśnień w komorze gazowej p_{kgmax} dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego

W tab. 6.9 przedstawiono obliczone wskaźniki statystyczne dla wyników przedstawionych w tab. 6.8.

Tab. 6.9. Obliczone wskaźniki statystyczne dla p_{kgmax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
K1	1,94	0,17	0,41	0,15	0,03
K2	1,37	0,06	0,14	0,05	0,00
K3	7,16	0,41	1,00	0,38	0,17
K4	3,81	0,13	0,33	0,12	0,02
K5	2,27	0,10	0,25	0,09	0,01
K6	1,22	0,06	0,14	0,05	0,00
K7	6,07	0,58	1,43	0,54	0,34
K8	3,96	0,06	0,15	0,06	0,00
K9	2,64	0,55	1,34	0,51	0,30
K10	1,40	0,10	0,24	0,09	0,01
K11	8,21	0,51	1,26	0,48	0,26
K12	5,02	0,11	0,26	0,10	0,01
K13	1,86	0,48	1,17	0,44	0,23
K14	1,44	0,06	0,15	0,06	0,00
K15	8,95	1,00	2,44	0,92	0,99
K16	4,74	0,10	0,24	0,09	0,01
K17	4,07	0,65	1,60	0,60	0,43

Tab. 6.9. c.d. Obliczone wskaźniki statystyczne dla p_{kgmax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
K18	2,32	0,03	0,08	0,03	0,00
K19	1,15	0,12	0,30	0,11	0,02
K20	5,09	0,15	0,36	0,14	0,02
K21	3,40	0,15	0,36	0,14	0,02
K22	3,28	0,16	0,39	0,15	0,03
K23	3,20	0,16	0,40	0,15	0,03
K24	3,55	0,12	0,30	0,11	0,02
K25	3,58	0,11	0,27	0,10	0,01
K26	2,82	0,09	0,21	0,08	0,01

Wyniki zawarte w tab. 6.9 były podstawą do obliczenia parametrów statystycznych obiektu przedstawionych w tab. 6.10.

Tab. 6.10. Obliczone parametry statystyczne obiektu dla p_{kgmax}

Parametr	Symbol	Wartość
Liczba powtórzeń	r	7
Liczba stopni swobody	$r-1$	6
Liczba konfiguracji	n	26
Częstość	f	156
Poziom istotności	α	0,05
Wariancja obiektu	$S^2(z)$	0,114
Odchylenie standardowe obiektu	$S(z)$	0,338
Błąd graniczny obiektu	e	0,667

6.2.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności

W celu aproksymacji funkcji obiektu dla p_{kgmax} jako wielkości wyjściowej przeprowadzono obliczenia tożsame z przedstawionymi w podrozdziale 6.1.2. Współczynniki funkcji aproksymującej wraz z odpowiadającymi im parametrami przedstawiono w tab. 6.11.

Tab. 6.11. Współczynniki funkcji aproksymującej funkcję obiektu wraz z odpowiadającymi im parametrami dla ρ_{kgmax} : POWA – parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA	Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b_0	3,086	-	b_{11}	-0,599	X_1X_2
b_1	-0,993	X_1	b_{12}	0,035	X_1X_3
b_2	2,097	X_2	b_{13}	-0,125	X_1X_4
b_3	-0,064	X_3	b_{14}	0,145	X_1X_5
b_4	0,379	X_4	b_{15}	0,005	X_2X_3
b_5	-0,240	X_5	b_{16}	0,336	X_2X_4
b_6	0,105	X_1^2	b_{17}	-0,061	X_2X_5
b_7	0,034	X_2^2	b_{18}	0,030	X_3X_4
b_8	0,252	X_3^2	b_{19}	-0,120	X_3X_5
b_9	0,291	X_4^2	b_{20}	-0,008	X_4X_5
b_{10}	0,111	X_5^2			

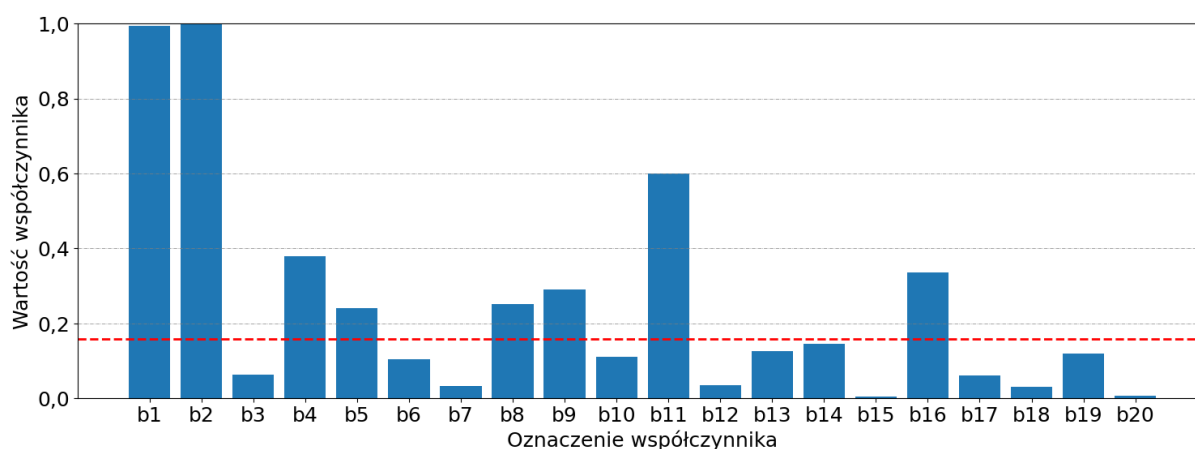
Funkcję aproksymującą funkcję obiektu dla ρ_{kgmax} przedstawiono poniżej (6.21):

$$\begin{aligned}
 f_A(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = & \\
 & = 3,086 - 0,993X_1 + 2,097X_2 - 0,064X_3 + 0,379X_4 - 0,240X_5 \\
 & + 0,105X_1^2 + 0,034X_2^2 + 0,252X_3^2 + 0,291X_4^2 + 0,111X_5^2 - 0,599X_1X_2 \quad (6.21) \\
 & + 0,035X_1X_3 - 0,125X_1X_4 + 0,145X_1X_5 + 0,005X_2X_3 + 0,336X_2X_4 \\
 & - 0,061X_2X_5 + 0,030X_3X_4 - 0,120X_3X_5 - 0,008X_4X_5
 \end{aligned}$$

W celu sprawdzenia adekwatności funkcji aproksymującej (wzór 6.21) obliczono błąd średniokwadratowy aproksymacji, który wyniósł $M = 0,089$. Następnie porównano go z odchyleniem standardowym obiektu wynoszącym $S(z) = 0,338$. Błąd średniokwadratowy aproksymacji był znacznie niższy od odchylenia standardowego obiektu. Największy błąd bezwzględny aproksymacji wynoszący $\Delta z_{max} = 0,200$ był również niższy od błędu granicznego obiektu wynoszącego $e = 0,667$. Można zatem stwierdzić, że funkcja jest adekwatna.

6.2.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu

W kolejnym kroku przeprowadzono weryfikację istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu dla p_{kgmax} (jako wielkości wyjściowej obiektu). Odchylenie standardowe współczynników wynosiło w tym przypadku 0,080, a krytyczna wartość zmiennej $t_{\alpha,f}$ dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i częstości $f = 156$ wynosiła 1,975. Iloczyn odchylenia standardowego współczynników oraz wartości krytycznej $t_{\alpha,f}$ wynoszący 0,158 przyjęto jako miarę wpływu zaburzeń losowych na wartości współczynników oraz porównano z tymi wartościami. Na rys. 6.13 przedstawiono porównanie bezwzględnych wartości współczynników funkcji aproksymującej. W celu zwiększenia przejrzystości zestawienia, celowo ograniczono zakres osi rzędnych, w związku z czym wartość współczynnika b_2 znajduje się poza nim. Czerwoną, przerywaną linią zaznaczono oszacowany wpływ zaburzeń losowych na wartość współczynników. Na tej podstawie stwierdzono, że w uproszczonej funkcji aproksymującej powinny być uwzględnione współczynniki $b_1, b_2, b_4, b_5, b_8, b_9, b_{11}$ oraz b_{16} . Z uwagi na bliskość wartości granicznej uwzględniono również współczynnik b_{14} .



Rys. 6.13. Bezwzględne wartości współczynników funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla p_{kgmax}

W tab. 6.12 przedstawiono współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej. W porównaniu z pełną funkcją zmianie uległy wartości wyrazu wolnego oraz współczynników związanych z nieliniowym oddziaływaniem masy zespołu odrzucanego (X_3^2) oraz średnicy tłoczyska (X_4^2) na obiekt badań.

Tab. 6.12. Współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla ρ_{kgmax} : POWA – parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b ₀	3,124	-
b ₁	-0,993	X ₁
b ₂	2,097	X ₂
b ₄	0,379	X ₄
b ₅	-0,240	X ₅
b ₈	0,349	X ₃ ²
b ₉	0,388	X ₄ ²
b ₁₁	-0,599	X ₁ X ₂
b ₁₄	0,145	X ₁ X ₅
b ₁₆	0,336	X ₂ X ₄

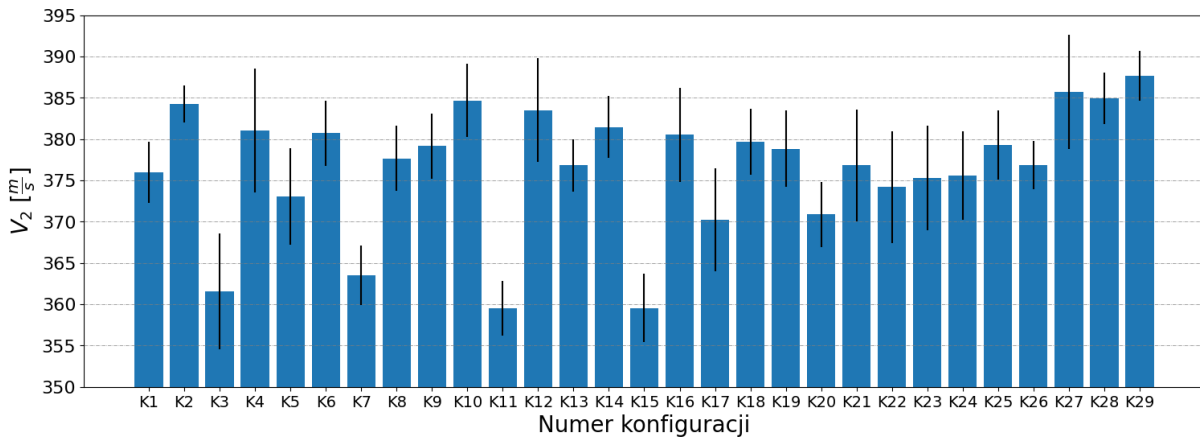
Uproszczona funkcja aproksymująca obiekt badań dla ρ_{kgmax} ma postać (6.22):

$$f_A(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = 3,124 - 0,993X_1 + 2,097X_2 + 0,379X_4 - 0,240X_5 + 0,349X_3^2 + 0,388X_4^2 - 0,599X_1X_2 + 0,145X_1X_5 + 0,336X_2X_4 \quad (6.22)$$

W celu weryfikacji, czy odrzucone współczynniki w rzeczywistości były nieistotne, sprawdzono adekwatność uproszczonej funkcji aproksymującej (wzór 6.22). Średniokwadratowy błąd aproksymacji wyniósł w tym przypadku $M = 0,192$ i był niższy od odchylenia standardowego obiektu wynoszącego $S(z) = 0,338$. Największy błąd bezwzględny aproksymacji $\Delta z_{max} = 0,380$ był również niższy od błędu granicznego obiektu wynoszącego $e = 0,667$. Można zatem stwierdzić, że funkcja jest adekwatna.

6.3. Badania prędkości pocisku na torze lotu

Badania prędkości pocisku w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy V_2 przeprowadzono zgodnie z Metodą nr 2 „Programu badań”. Wykorzystując bramkę optoelektroniczną mierzono czas, w jakim pocisk przebył odległość 0,5 m (długość bazy pomiarowej bramki). Na podstawie tego pomiaru, oprogramowanie obliczało prędkość pocisku. Zestawienie średnich prędkości V_2 dla różnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 6.14.



Rys. 6.14. Zestawienie średnich prędkości pocisku na torze lotu V_2 dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego wraz z naniesionymi odchyleniami standardowymi próbki

6.3.1. Analiza statystyczna wyników badań prędkości pocisku na torze lotu

W tab. 6.13 przedstawiono wartości prędkości pocisku określone w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy V_2 dla każdej z konfiguracji stanowiska laboratoryjnego dla Metodyki nr 2 „Programu badań”. W tabeli umieszczono również obliczoną średnią arytmetyczną \bar{z} i odchylenie standardowe próbki dla każdej z konfiguracji $S(z)$. Dodatkowo, przedstawiono wyniki dla konfiguracji nr K27÷K29, w których układ opóźnienia gazowego został wyłączony (przez zaślepienie otworów gazowych), a zmieniana była tylko masa zespołu odrzucanego. Obiekt badań w tych konfiguracjach działał na zasadzie zamka swobodnego, a pomiary dla tych konfiguracji wykonano do celów porównawczych i nie podlegały analizie statystycznej.

Tab. 6.13. Prędkość pocisku na torze lotu V_2 określona dla wszystkich wykonanych prób na stanowisku badawczym w każdej konfiguracji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	V_2 [m/s]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K1	370,92	374,25	376,51	375,38	382,26	373,69	378,79	375,97	3,69
K2	382,26	381,10	387,00	384,62	383,44	384,62	387,00	384,29	2,23
K3	360,23	363,37	358,17	348,19	366,57	364,43	369,82	361,54	7,03
K4	392,46	375,38	387,60	377,64	375,38	373,13	385,80	381,06	7,47
K5	370,92	370,92	364,43	370,92	380,23	373,13	381,10	373,09	5,83
K6	379,94	375,38	377,64	378,79	383,73	382,56	387,00	380,72	3,96
K7	364,43	366,57	364,43	361,27	358,17	361,01	368,73	363,52	3,61

Tab. 6.13. c.d. Prędkość pocisku na torze lotu V_2 określona dla wszystkich wykonanych prób na stanowisku badawczym w każdej konfiguracji: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	V_2 [m/s]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K8	384,62	379,94	377,64	377,64	377,64	373,13	373,13	377,68	3,97
K9	375,38	375,38	378,79	384,62	382,26	375,38	382,26	379,15	3,92
K10	388,20	384,62	388,80	388,80	384,62	377,64	379,94	384,66	4,44
K11	362,32	358,17	364,43	356,13	360,23	355,11	360,23	359,52	3,31
K12	391,85	372,58	384,62	382,26	389,41	383,44	380,52	383,52	6,27
K13	381,10	378,50	373,13	379,94	373,13	376,51	375,38	376,81	3,17
K14	381,10	387,00	386,10	377,64	380,81	379,94	377,64	381,46	3,75
K15	364,43	354,11	362,32	358,17	362,32	354,11	361,27	359,53	4,15
K16	374,53	377,64	387,00	378,79	389,41	380,81	375,38	380,51	5,70
K17	368,73	362,32	366,57	373,13	375,66	379,94	365,50	370,26	6,23
K18	380,23	377,64	375,38	374,25	383,44	382,26	384,62	379,69	4,03
K19	379,94	382,26	378,79	384,62	381,10	373,13	372,02	378,84	4,66
K20	375,38	376,22	368,73	367,65	365,50	370,92	371,75	370,88	3,95
K21	369,82	377,64	379,94	388,50	370,92	379,94	370,92	376,81	6,77
K22	378,79	379,94	373,13	370,92	368,73	383,44	364,43	374,20	6,79
K23	373,13	384,62	376,51	366,57	382,26	373,13	370,92	375,31	6,34
K24	373,13	375,38	375,94	372,58	377,64	368,73	385,80	375,60	5,34
K25	377,36	379,94	384,62	377,64	373,13	377,64	384,62	379,28	4,17
K26	378,79	379,94	373,13	374,25	379,94	374,25	377,64	376,85	2,91
K27	387,00	387,90	389,41	384,62	373,13	395,57	382,26	385,70	6,93
K28	387,00	382,26	381,10	389,41	387,00	382,26	385,80	384,98	3,12
K29	386,70	393,08	384,62	387,00	385,80	390,63	385,80	387,66	3,05

W tab. 6.14 przedstawiono obliczone wskaźniki statystyczne dla wyników z tab. 6.15.

Tab. 6.15. Obliczone wskaźniki statystyczne dla V_2 : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
K1	375,97	3,69	9,04	3,42	13,64
K2	384,29	2,23	5,46	2,06	4,98
K3	361,54	7,03	17,21	6,51	49,49
K4	381,06	7,47	18,27	6,90	55,73

Tab. 6.15. c.d. Obliczone wskaźniki statystyczne dla V_2 : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
K5	373,09	5,83	14,27	5,40	34,03
K6	380,72	3,96	9,70	3,66	15,70
K7	363,52	3,61	8,83	3,34	13,02
K8	377,68	3,97	9,71	3,67	15,76
K9	379,15	3,92	9,59	3,62	15,35
K10	384,66	4,44	10,87	4,11	19,73
K11	359,52	3,31	8,10	3,06	10,96
K12	383,52	6,27	15,33	5,80	39,26
K13	376,81	3,17	7,75	2,93	10,03
K14	381,46	3,75	9,17	3,46	14,03
K15	359,53	4,15	10,15	3,84	17,21
K16	380,51	5,70	13,94	5,27	32,44
K17	370,26	6,23	15,24	5,76	38,80
K18	379,69	4,03	9,87	3,73	16,26
K19	378,84	4,66	11,41	4,31	21,73
K20	370,88	3,95	9,66	3,65	15,59
K21	376,81	6,77	16,57	6,26	45,86
K22	374,20	6,79	16,61	6,28	46,08
K23	375,31	6,34	15,52	5,87	40,25
K24	375,60	5,34	13,06	4,93	28,47
K25	379,28	4,17	10,20	3,85	17,36
K26	376,85	2,91	7,12	2,69	8,46

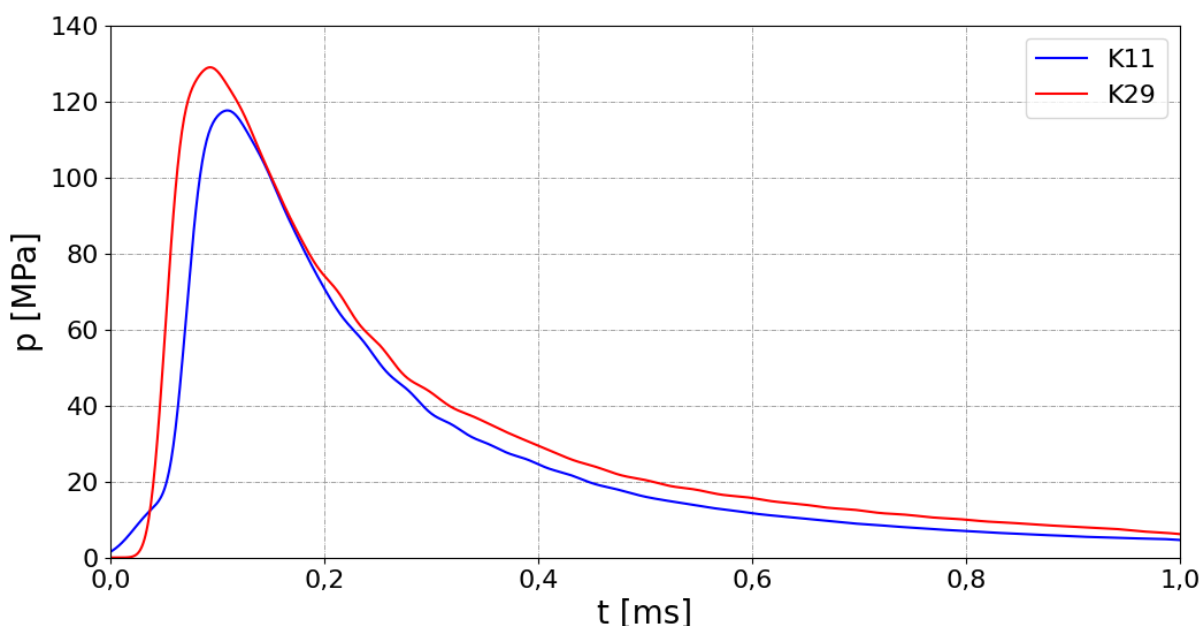
Zawarte w tab. 6.15 wyniki były podstawą do obliczenia parametrów statystycznych charakteryzujących obiekt badań, które przedstawiono w tab. 6.16.

Tab. 6.16. Obliczone parametry statystyczne obiektu dla V_2

Parametr	Symbol	Wartość
Liczba powtórzeń	r	7
Liczba stopni swobody	$r-1$	6
Liczba konfiguracji	n	26
Częstość	f	156
Poziom istotności	α	0,05
Wariancja obiektu	$S^2(z)$	24,620
Odchylenie standardowe obiektu	$S(z)$	4,962
Błąd graniczny obiektu	e	9,802

Analiza wyników pomiarów V_2 wskazuje na znaczny spadek tej prędkości w konfiguracjach stanowiska laboratoryjnego, w których wykorzystywano otwór gazowy o średnicy 1,8 mm, umieszczony w odległości 21,5 mm od płasku wlotowego lufy (konfiguracje stanowiska: K3, K7, K11 i K15). W skrajnym przypadku, porównując konfiguracje K11 oraz K29, V_2 spadła o około 8%, co dla pocisku o masie 8 g oznacza spadek jego energii kinetycznej o około 16%. Przebiegi ciśnienia w przewodzie lufy w funkcji czasu dla reprezentatywnych prób w konfiguracjach stanowiska laboratoryjnego K11 i K29 przedstawiono na rys. 6.30.

Analizując wyniki pomiarów oraz rys. 6.15 można stwierdzić, że ciśnienie maksymalne w przewodzie lufy dla konfiguracji K11 było niższe o około 9% w odniesieniu do konfiguracji K29. Zauważalny jest również odmienny charakter narastania ciśnienia, wynikający prawdopodobnie z tego, że w przypadku konfiguracji K11 występuje stosunkowo duży przepływ gazów prochowych do komory gazowej.



Rys. 6.15. Przebiegi ciśnienia w przewodzie lufy p w funkcji czasu t dla reprezentatywnych prób w konfiguracjach stanowiska laboratoryjnego K11 i K29

6.3.2. Aproksymacja funkcji obiektu i sprawdzenie jej adekwatności

W celu aproksymacji funkcji obiektu dla wielkości wyjściowej V_2 przeprowadzono obliczenia tożsame z przedstawionymi w podrozdziale 6.1.2. Współczynniki funkcji aproksymującej wraz z odpowiadającymi im parametrami przedstawiono w tab. 6.17.

Tab. 6.17. Współczynniki funkcji aproksymującej funkcję obiektu wraz z odpowiadającymi im parametrami dla V_2 : POWA – parametr obiektu, do którego odnosi się współczynnik funkcji aproksymującej

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA	Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b_0	375,916	-	b_{11}	3,285	X_1X_2
b_1	6,344	X_1	b_{12}	-0,621	X_1X_3
b_2	-4,291	X_2	b_{13}	0,345	X_1X_4
b_3	-1,056	X_3	b_{14}	-0,157	X_1X_5
b_4	0,422	X_4	b_{15}	0,474	X_2X_3
b_5	0,003	X_5	b_{16}	-0,545	X_2X_4
b_6	-0,941	X_1^2	b_{17}	0,135	X_2X_5
b_7	-1,059	X_2^2	b_{18}	-0,043	X_3X_4
b_8	-0,412	X_3^2	b_{19}	1,068	X_3X_5
b_9	-0,463	X_4^2	b_{20}	-0,427	X_4X_5
b_{10}	2,148	X_5^2			

Funkcję aproksymującą funkcję obiektu dla V_2 przedstawiono poniżej (6.23):

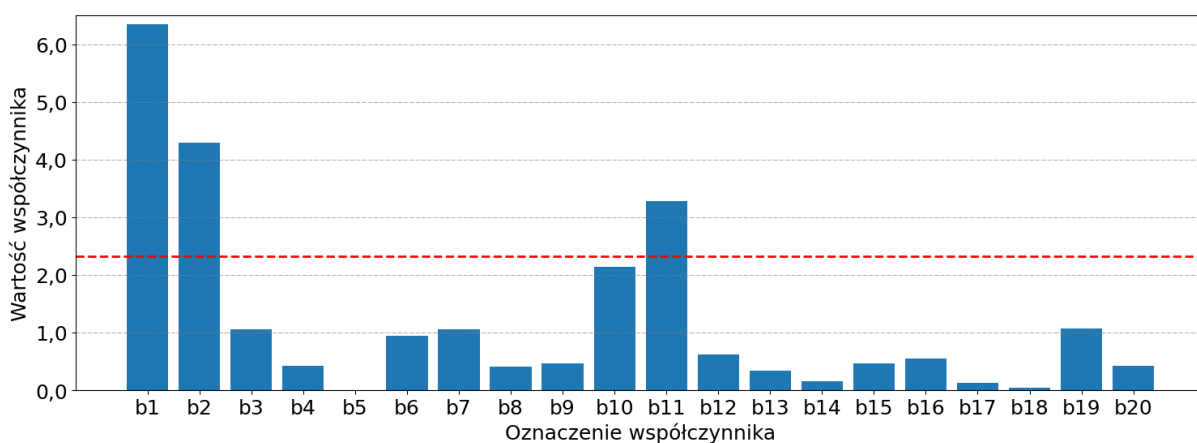
$$\begin{aligned}
 f_A(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = & \\
 = & 375,916 + 6,344X_1 - 4,291X_2 - 1,056X_3 + 0,422X_4 + 0,003X_5 \\
 & - 0,941X_1^2 - 1,059X_2^2 - 0,412X_3^2 - 0,463X_4^2 + 2,148X_5^2 \quad (6.23) \\
 & + 3,285X_1X_2 - 0,621X_1X_3 + 0,345X_1X_4 - 0,157X_1X_5 + 0,474X_2X_3 \\
 & - 0,545X_2X_4 + 0,135X_2X_5 - 0,043X_3X_4 + 1,068X_3X_5 - 0,427X_4X_5
 \end{aligned}$$

Aby sprawdzić adekwatność funkcji aproksymującej (wzór 6.23) obliczono błąd średniokwadratowy aproksymacji, który wyniósł $M = 0,616$. Porównano go z odchyleniem standardowym obiektu wynoszącym $S(z) = 4,962$. Błąd średniokwadratowy aproksymacji był znacznie niższy od odchylenia standardowego obiektu. Największy błąd bezwzględny aproksymacji wynoszący $\Delta z_{max} = 1,63$ także był niższy od błędu granicznego obiektu $e = 9,80$. Można na tej podstawie stwierdzić, że funkcja jest adekwatna.

6.3.3. Weryfikacja istotności współczynników aproksymacji funkcji obiektu

W kolejnym kroku przeprowadzono weryfikację istotności współczynników funkcji obiektu dla V_2 jako wielkości wyjściowej obiektu. Odchylenie standardowe

współczynników wyniosło w tym przypadku 1,174, a krytyczna wartość zmiennej $t_{\alpha,f}$ dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i częstości $f = 156$ wyniosła 1,975. Iloczyn odchylenia standardowego współczynników oraz wartości krytycznej $t_{\alpha,f}$ wynoszący 2,32 przyjęto jako miarę wpływu zaburzeń losowych na wartości współczynników oraz porównano z tymi wartościami. Na rys. 6.16 zestawiono bezwzględne wartości współczynników funkcji aproksymującej. Czerwoną, przerywaną linią zaznaczono oszacowany wpływ zaburzeń losowych na wartość współczynników. Na tej podstawie stwierdzono, że w funkcji aproksymującej powinny być uwzględnione współczynniki b_1 , b_2 i b_{11} . Z uwagi na bliskość wartości granicznej uwzględniono również współczynnik b_{10} .



Rys. 6.16. Bezwzględne wartości współczynników funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla V_2

W tab. 6.18 przedstawiono współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej. W porównaniu z kompletną funkcją zmianie uległy wartości wyrazu wolnego oraz współczynników związanych z nieliniowym oddziaływaniem długości tłoczyska (X_5^2) na obiekt badań.

Tab. 6.18. Współczynniki uproszczonej funkcji aproksymującej funkcję obiektu dla V_2

Współczynnik	Wartość współczynnika	POWA
b_0	375,198	-
b_1	6,344	X_1
b_2	-4,291	X_2
b_{10}	0,311	X_5^2
b_{11}	3,285	X_1X_2

Uproszczona funkcja aproksymująca funkcję obiektu dla V_2 ma postać:

$$f_A(X_1, X_2, X_5) = 375,198 + 6,344X_1 - 4,291X_2 + 0,311X_5^2 + 3,285X_1X_2 \quad (6.24)$$

W celu weryfikacji, czy odrzucone współczynniki w rzeczywistości były nieistotne sprawdzono adekwatność uproszczonej funkcji aproksymującej (wzór 6.24). Średniokwadratowy błąd aproksymacji wyniósł w tym przypadku $M = 1,827$ i był niższy od odchylenia standardowego obiektu wynoszącego $S(z) = 4,962$. Największy błąd bezwzględny aproksymacji $\Delta z_{max} = 3,77$ również był niższy od błędu granicznego obiektu wynoszącego $e = 9,80$. Na tej podstawie można stwierdzić, że funkcja jest adekwatna.

6.4. Podsumowanie rozdziału VI

Na podstawie analizy wyników badań wykonanych na stanowisku laboratoryjnym, zgodnie z Metodyką nr 2 „Programu badań” można stwierdzić, że:

- zaprojektowana modyfikacja układu konstrukcyjnego broni działającej na zasadzie OZPOG z tłokiem gazowym (przedstawiona rozdziale III) jest skuteczna. W 29 konfiguracjach stanowiska, które poddano badaniom, wystąpiło maksymalnie około 21% redukcji maksymalnej prędkości zespołu odrzucanego dla jego stałej masy wynoszącej 420 g (przekłada się to na zmniejszenie energii kinetycznej zespołu odrzucanego o około 32%) oraz około 31% redukcji v_{zomax} dla m_{zo} wynoszącej 360 g (przekłada się to na zmniejszenie energii kinetycznej zespołu odrzucanego o około 43%);
- pojawił się istotny problem eksploatacyjny tego typu układów konstrukcyjnych. Mianowicie, w konfiguracjach stanowiska laboratoryjnego z otworem gazowym umieszczonym najbliżej płasku wlotowego lufy (21,5 mm) obserwowano przedostawanie się fragmentów płaszcza pocisków do komory gazowej. Pomimo tego, że nie zauważono znacznego wpływu tego zjawiska na powtarzalność wartości v_{zomax} , z punktu widzenia eksploatacji broni, obecność fragmentów płaszcza w komorze gazowej jest wysoce niepożądana. Zjawisko to nie występowało w konfiguracjach stanowiska, w których wykorzystywano otwór gazowy umieszczony w odległości 36,5 mm i 51,5 mm od płasku wlotowego lufy;

- największy wpływ na maksymalną prędkość zespołu odrzucanego w badanym układzie ma jego masa. Analiza wykazała, że wpływ ten jest nieliniowy. Wpływ odległości otworu gazowego od płasku wlotowego lufy oraz średnicy otworu gazowego na tle rozrzutu losowego może być rozpatrywany jako liniowy. Dodatkowo parametry te mają wpływ na odpowiedź układu poprzez współdziałanie. Zależność od średnicy tłoka gazowego oraz długości tłoczyska występuje tylko przy współdziałaniu tych parametrów. Może to wskazywać na to, że zmiana objętości komory gazowej ma liniowy wpływ na działanie układu. Również średnica otworu gazowego oraz średnica tłoka gazowego wpływają na układ przez swoje współdziałanie. Ma to związek ze zmianą charakteru przepływu gazów prochowych, co skutkuje zmianą współczynnika strat przepływu z lufy do komory gazowej.
- wyniki pomiarów ciśnienia w komorze gazowej dla konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, w których otwór gazowy znajdował się najbliżej płasku wlotowego lufy (21,5 mm) charakteryzowały się zauważalnie wyższym rozrzutem. Zestawiając wyniki v_{zomax} dla tych konfiguracji można stwierdzić, że duży rozrzut p_{kgmax} nie miał znacznego wpływu na ich powtarzalność. Może to świadczyć o tym, że zmodyfikowany układ z OZPOG pracuje stabilnie przy dużych rozrzutach parametrów związanych z ciśnieniami występującymi podczas strzału. Zagadnienie to rozszerzono w rozdziale VII, podczas realizacji Metodyki nr 3 „Programu Badań”;
- w sposób istotny p_{kgmax} liniowo zależy od odległości otworu gazowego od płasku wlotowego lufy, średnicy tego otworu oraz długości tłoczyska. Nieliniowo na to ciśnienie wpływa masa zespołu odrzucanego oraz średnica tłoczyska (parametr ten ma znaczny wpływ zarówno liniowy jak i nieliniowy). Dodatkowo, na ciśnienie gazów prochowych w komorze gazowej, poprzez współdziałanie, wpływają parametry X_1X_2 , X_1X_5 oraz X_2X_4 ;
- na prędkość pocisku na torze lotu w sposób istotny liniowo wpływa położenie otworu gazowego oraz średnica tego otworu. Parametry te oddziałują na tą prędkość również przez współdziałanie. Wynika to z tego, że w głównej mierze od tych dwóch parametrów zależy, ile gazów prochowych przepłynie z lufy do komory gazowej zanim pocisk opuści lufę. Dodatkowo, w zauważalnie mniejszym stopniu, na prędkość pocisku nieliniowo wpływa długość tłoczyska. Parametr ten w dużym

stopniu definiuje objętość komory gazowej. Im ta objętość jest większa, tym więcej gazów prochowych może przepłynąć do tej komory;

- dla konfiguracji stanowiska, w których otwór gazowy o średnicy 1,8 mm znajdował się w odległości 21,5 mm od płasku wlotowego lufy (konfiguracja K11), V_2 spadła o około 8% w stosunku do konfiguracji z wyłączonym układem gazowym (konfiguracja K29). Dla pocisku o masie 8 g przekłada się to na zmniejszenie jego energii kinetycznej o około 16%. Tak duży spadek prędkości będzie wpływał negatywnie na skuteczność oddziaływania pocisku na cel.

ROZDZIAŁ VII

BADANIA WPŁYWU ŁADUNKU MIOTAJĄCEGO NABOJU PISTOLETOWEGO NA DZIAŁANIE UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO

7.1. Wyniki badań

W celu określenia wpływu ładunku miotającego na działanie układu z OZPOG przeprowadzono badania zgodnie z Metodyką nr 3 „Programu badań” (załącznik nr 2). W tym celu opracowano dwuwartościowy plan frakcyjny doświadczenia. Parametry X_4 i X_5 obliczono z relacji generujących (X_4 – dla kontrastu równego 1, X_5 – dla kontrastu równego -1). Zastosowanie dwóch relacji generujących miało na celu ograniczenie liczby prób oraz randomizację zastosowanych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego. Plan doświadczenia dla wielkości unormowanych przedstawiono w tab. 7.1.

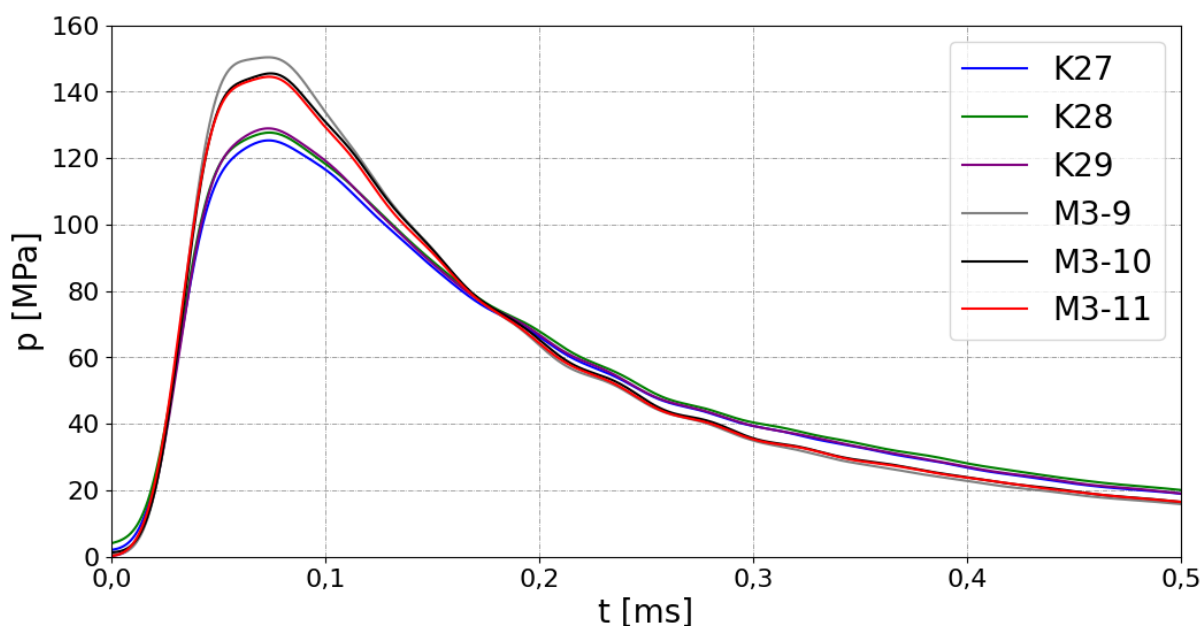
Tab. 7.1. Plan doświadczenia dla wielkości unormowanych (Metodyka nr 3 „Programu badań”): X_1 – odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy, X_2 – średnica otworu gazowego, X_3 – masa zespołu odrzucanego, X_4 – średnica tłoczyska, X_5 – długość tłoczyska

Numer konfiguracji	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
M3-1	-1	-1	-1	-1	-1
M3-2	1	-1	-1	1	1
M3-3	-1	1	-1	1	1
M3-4	1	1	-1	-1	-1
M3-5	-1	-1	1	1	-1
M3-6	1	-1	1	-1	1
M3-7	-1	1	1	-1	1
M3-8	1	1	1	1	-1
M3-9	-	-	-1	1	1
M3-10	-	-	0	1	1
M3-11	-	-	1	1	1

W celu zwiększenia przejrzystości oznaczeń, w ramach kolejnych metodyk oznaczenia konfiguracji zawierają numer metodyki (np. konfiguracja M3-1 oznacza pierwszą konfigurację stanowiska laboratoryjnego dla badań wykonywanych zgodnie z metodyką nr 3). Podobnie, jak w przypadku planu doświadczenia z metodyki nr 2

(tab. 6.2), w celach porównawczych, dodano trzy konfiguracje (M3-9, M3-10 i M3-11), w których obiekt działał jak zamek swobodny (układ gazowy został wyłączony).

Do badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego wykorzystano amunicję fabryczną PARA GECO oraz elaborowaną prochem RS20 w naważce 0,36 g (oznaczaną dalej jako PARA RS20). W pierwszej kolejności porównano ciśnienia występujące w lufie podczas strzału $p(t)$ dla tych dwóch typów amunicji. Aby wyeliminować wpływ działania układu gazowego, wykorzystano wyniki dla konfiguracji, w których był on wyłączony, a zmieniano tylko masę zespołu odrzucanego. Przebiegi $p(t)$ dla amunicji: PARA GECO dla konfiguracji K27÷K29 (tab. 6.2) oraz PARA RS20 dla konfiguracji M3-9÷M3-11 (tab. 7.1) przedstawiono na rys. 7.1. Na rysunku tym zamieszczono reprezentatywne przebiegi $p(t)$, w których wartość p_{max} była najbardziej zbliżona do średniej. Z kolei wartości p_{max} , wartości średnie \bar{z} oraz odchylenia standardowe próbki $S(z)$ przedstawiono w tab. 7.2.



Rys. 7.1. Przebiegi ciśnienia w lufie p w funkcji czasu t dla amunicji: PARA GECO dla konfiguracji K27÷K29 oraz PARA RS20 dla konfiguracji M3-9÷M3-11 stanowiska laboratoryjnego

Tab. 7.2. Maksymalne ciśnienia w przewodzie lufy p_{max} dla amunicji: PARA GECO dla konfiguracji K27÷K29 oraz PARA RS20 dla konfiguracji M3-9÷M3-11 stanowiska laboratoryjnego: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	p_{max} [MPa]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K27	128,33	127,61	128,72	125,36	117,92	132,56	123,26	126,25	4,68
K28	129,34	127,71	124,30	130,63	124,57	126,75	128,19	127,36	2,34

Tab. 7.2. c.d. Maksymalne ciśnienia w przewodzie lufy p_{max} dla amunicji: PARA GECO dla konfiguracji K27÷K29 oraz PARA RS20 dla konfiguracji M3-9÷M3-11 stanowiska laboratoryjnego: \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki

Numer konfiguracji	p_{max} [MPa]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
K29	128,97	129,26	125,17	126,22	125,19	134,69	126,91	128,06	3,35
M3-9	156,14	150,05	152,31	149,75	151,69	150,39	146,12	150,92	3,03
M3-10	144,19	139,78	149,05	145,53	146,40	144,96	147,55	145,35	2,95
M3-11	141,44	148,78	140,40	150,84	144,06	141,30	144,52	144,48	3,98

7.2. Analiza statystyczna wyników badań

W celu porównania obu typów amunicji uśredniono p_{max} oraz $S(z)$ dla konfiguracji, w których wykorzystywano amunicję PARA GECO (K27÷K29). Tak samo postąpiono dla konfiguracji, w których wykorzystywano amunicję PARA RS20 (M3-9÷M3-11). Po uśrednieniu przyjęto, że średnie p_{max} dla amunicji PARA GECO wynosiło $127,22 \pm 3,46$ MPa, natomiast dla amunicji PARA RS20 – $146,92 \pm 3,32$ MPa. Amunicja PARA RS20 charakteryzowała się około 13,5% wyższym p_{max} od amunicji PARA GECO przy bardzo zbliżonym charakterze przebiegów tego ciśnienia. W związku z tym, że wystąpiła znacząca różnica w p_{max} dla obu typów amunicji, można było przeprowadzić badania wpływu ładunku miotającego na działanie układu z OZPOG przy wykorzystaniu amunicji PARA GECO i PARA RS20.

W tab. 7.3 przedstawiono obliczone wskaźniki statystyczne dla v_{zomax} : średnią arytmetyczną \bar{z} , odchylenie standardowe próbki $S(z)$, błąd graniczny pomiaru e_1 , błąd graniczny wartości średniej e oraz wariancję niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń) $S^2(z)$.

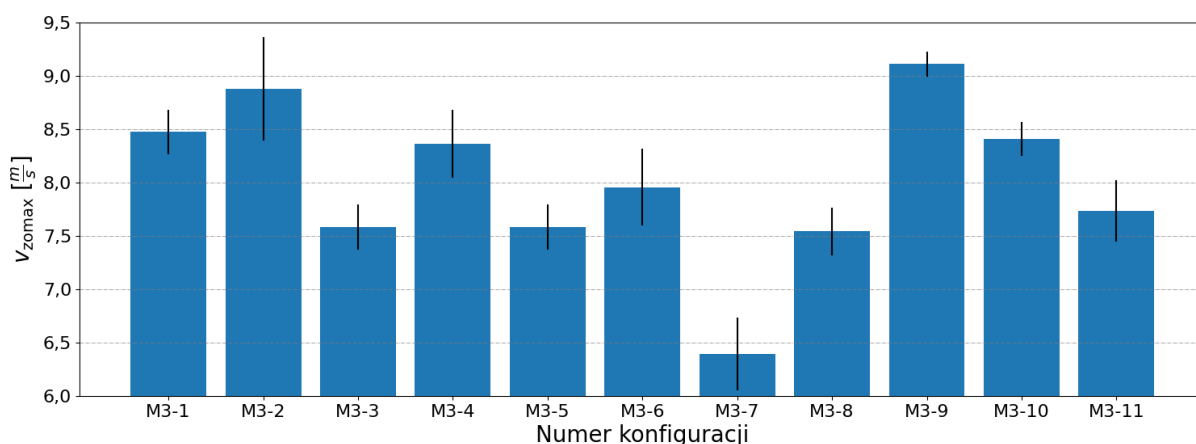
Tab. 7.3. Obliczone wskaźniki statystyczne dla v_{zomax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
M3-1	8,56	0,23	0,55	0,21	0,05
M3-2	8,92	0,52	1,28	0,49	0,28
M3-3	7,65	0,23	0,56	0,21	0,05
M3-4	8,46	0,34	0,83	0,32	0,12
M3-5	7,61	0,19	0,48	0,18	0,04

Tab. 7.3. c.d. Obliczone wskaźniki statystyczne dla v_{zomax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
M3-6	7,98	0,39	0,96	0,36	0,15
M3-7	6,40	0,37	0,90	0,34	0,14
M3-8	7,57	0,24	0,60	0,23	0,06

Z kolei na rys. 7.2 przedstawiono v_{zomax} z odchyleniami standardowymi próbki dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego (tab. 7.1).



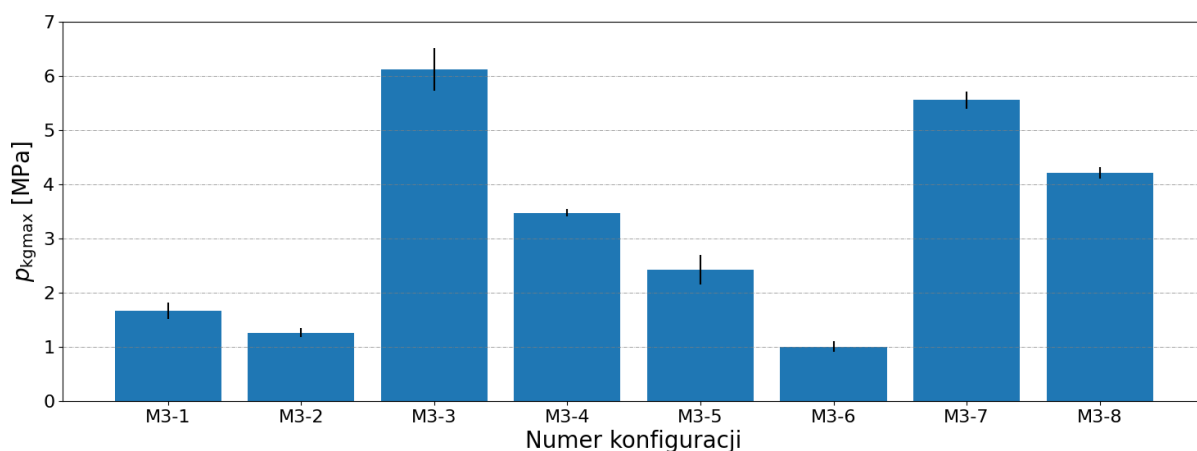
Rys. 7.2. Maksymalne prędkości zespołu odrzucanego v_{zomax} z odchyleniami standardowymi próbki dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego

Analogicznie jak w tab. 7.3, w tab. 7.4 przedstawiono obliczone wskaźniki statystyczne p_{kgmax} dla badanych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego przedstawionych w tab. 7.1.

Tab. 7.4. Obliczone wskaźniki statystyczne p_{kgmax} : \bar{z} – średnia arytmetyczna, $S(z)$ – odchylenie standardowe próbki, e_1 – błąd graniczny pomiaru, e – błąd graniczny wartości średniej, $S^2(z)$ – wariancja niedokładności pomiarów (dla jednakowej liczby powtórzeń)

Numer konfiguracji	\bar{z}	$S(z)$	e_1	e	$S^2(z)$
M3-1	1,66	0,16	0,40	0,15	0,03
M3-2	1,26	0,09	0,22	0,08	0,01
M3-3	6,15	0,42	1,04	0,39	0,18
M3-4	3,47	0,08	0,19	0,07	0,01
M3-5	2,42	0,25	0,61	0,23	0,06
M3-6	1,00	0,11	0,26	0,10	0,01
M3-7	5,56	0,17	0,42	0,16	0,03
M3-8	4,20	0,11	0,27	0,10	0,01

Na rys. 7.3 przedstawiono graficzne zestawienie średnich ρ_{kgmax} dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi na słupkach odchyleniami standardowymi próbek.



Rys. 6.3. Zestawienie średnich maksymalnych ciśnień w komorze gazowej ρ_{kgmax} dla poszczególnych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego

Wyniki przedstawione w tab. 7.3 i 7.4 były podstawą do obliczenia wskaźników statystycznych charakteryzujących obiekt dla v_{zomax} i ρ_{kgmax} (tab. 7.5).

Tab. 7.5. Wskaźniki statystyczne charakteryzujące obiekt dla v_{zomax} i ρ_{kgmax}

Wyszczególnienie	Symbol	Wartość	
		v_{zomax}	ρ_{kgmax}
Liczba powtórzeń	r	7	
Liczba stopni swobody	$r-1$	6	
Liczba konfiguracji	n	8	
Częstość	f	48	
Poziom istotności	α	0,05	
Wariancja obiektu	$S^2(z)$	0,110	0,040
Odchylenie standardowe obiektu	$S(z)$	0,332	0,205
Błąd graniczny obiektu	e	0,667	0,412

W celu określenia, czy ładunek miotający ma wpływ na v_{zomax} i ρ_{kgmax} , przeprowadzono testy statystyczne. Porównano wyniki badań eksperymentalnych dla jądra planu Bi z Metodyki nr 2 „Programu badań”, które opracowano na podstawie planu frakcyjnego zawierającego 16 konfiguracji, oraz dla planu frakcyjnego z Metodyki nr 3 „Programu badań”, zawierającego 8 konfiguracji. Plan frakcyjny

charakteryzuje się tym, że średnia wartość wyników dla wszystkich konfiguracji dąży do wartości osiągniętej w centrum planu. Daje to możliwość porównania tych dwóch zbiorów wyników. W związku z tym, że liczba pomiarów była mniejsza od 30, do przeprowadzenia testu istotności wybrano rozkład t-Studenta opisany w podrozdziale 2.2. Przedział krytyczny T_{kr} dla rozkładu t-Studenta w tym przypadku zawiera się w $(-\infty, -2,07) \cap (2,07, +\infty)$.

a) test istotności dla prędkości zespołu odrzucanego

Sformułowano hipotezę zerową: wartości średnie są sobie równe, czyli ładunek miotający nie wpływa w sposób istotny na prędkość zespołu odrzucanego. Następnie obliczono parametr T , który wyniósł $T = 0,79$. Wartość parametru T nie należy do przedziału krytycznego więc można stwierdzić, że hipoteza zerowa jest prawdziwa. Ładunek miotający nie wpływa w istotny sposób na V_{zomax} .

b) test istotności dla ciśnienia w komorze gazowej

Sformułowano hipotezę zerową: wartości średnie są sobie równe, czyli ładunek miotający nie wpływa w sposób istotny na ciśnienie w komorze gazowej. Następnie obliczono parametr T , który wyniósł $T = -5,89$. Wartość parametru T należy do przedziału krytycznego, dlatego można stwierdzić, że hipoteza zerowa nie jest prawdziwa. Nie można więc jednoznacznie stwierdzić, że ładunek miotający nie wpływa w sposób istotny na p_{kgmax} .

7.3. Podsumowanie rozdziału VII

Na podstawie analizy wyników badań wykonanych na stanowisku laboratoryjnym, zgodnie z Metodyką nr 3 „Programu badań” można stwierdzić, że:

- różnica ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy wynosząca około 13,5% nie wpływa w sposób istotny na prędkość zespołu odrzucanego w układzie z OZPOG;
- różnica ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy, wynosząca około 13,5%, może istotnie wpływać na wartość maksymalnego ciśnienia w komorze gazowej dla układów z OZPOG;
- zaproponowany układ z OZPOG z dużym prawdopodobieństwem będzie działał stabilnie przy wykorzystaniu różnych typów amunicji, które mogą charakteryzować

się różnymi parametrami balistycznymi. Jest to pozytywna cecha układu, która będzie miała istotny wpływ na niezawodne działanie broni w przypadku stosowania amunicji różnych producentów.

Strona celowo zostawiona pusta

ROZDZIAŁ VIII

BADANIA WPŁYWU GEOMETRII OTWORU GAZOWEGO NA DZIAŁANIE UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO

8.1. Wyniki badań

Badania wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu z OZPOG przeprowadzono zgodnie z Metodyką nr 4 „Programu badań”, którą przedstawiono w załączniku nr 2 do niniejszej pracy. W tym celu opracowano plan doświadczenia składający się z 6 konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, przedstawionych w tab. 8.1.

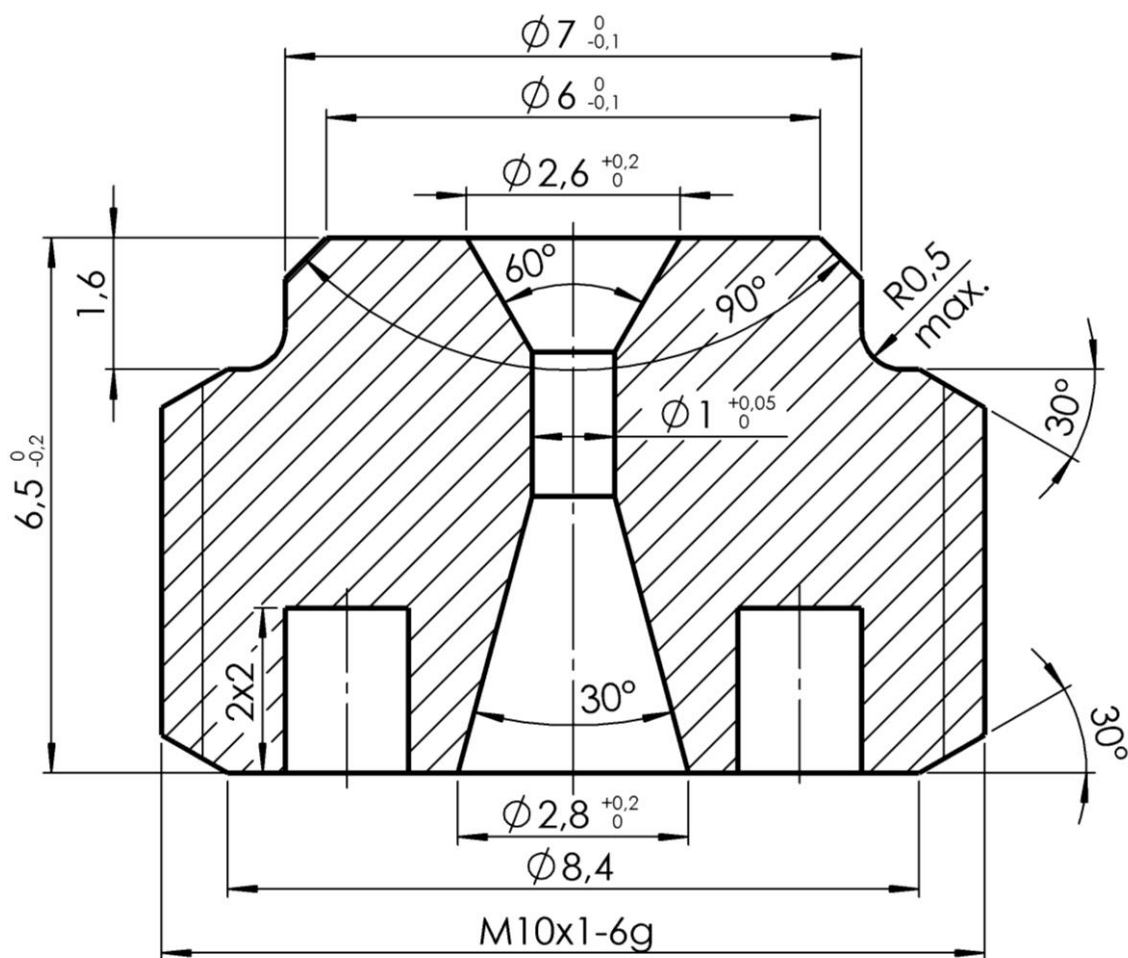
Tab. 8.1. Plan doświadczenia dla wielkości nieunormowanych (Metodyka nr 4 „Programu badań”): x_1 – odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy, x_2 – średnica otworu gazowego, x_3 – masa zespołu odrzucanego, x_4 – średnica tłoczyska, x_5 – długość tłoczyska

Numer konfiguracji	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
M4-1	36,5	1,0	390	4	101
M4-2	36,5	1,4	390	4	101
M4-3	36,5	1,8	390	4	101
M4-4	36,5	1,0 (dysza)	390	4	101
M4-5	36,5	1,4 (dysza)	390	4	101
M4-6	36,5	1,8 (dysza)	390	4	101

W ramach tych konfiguracji (tab. 8.1) zmieniano jedynie wkrętkę z otworem gazowym, a pozostałe parametry wejściowe układu były stałe. Wykorzystano trzy wkrętki o stałym przekroju otworu gazowego (o średnicach: 1,0, 1,4 i 1,8 mm) oraz trzy wkrętki o geometrii otworu gazowego w kształcie dyszy z przekrojami krytycznymi o takich samych średnicach, jak w przypadku wkrętek o stałym przekroju otworu gazowego. Przekrój zaprojektowanej wkrętki z otworem o średnicy 1,0 mm w kształcie dyszy przedstawiono na rys. 8.1. Analogicznie, dla wkrętek o średnicy otworu 1,4 mm oraz 1,8 mm zmieniano tylko średnicę (krytyczną). Kąt rozwarcia dyszy od strony wlotu gazów prochowych z lufy wynosi 60°, a kąt rozwarcia dyszy od strony wylotu gazów prochowych do komory gazowej – 30°.

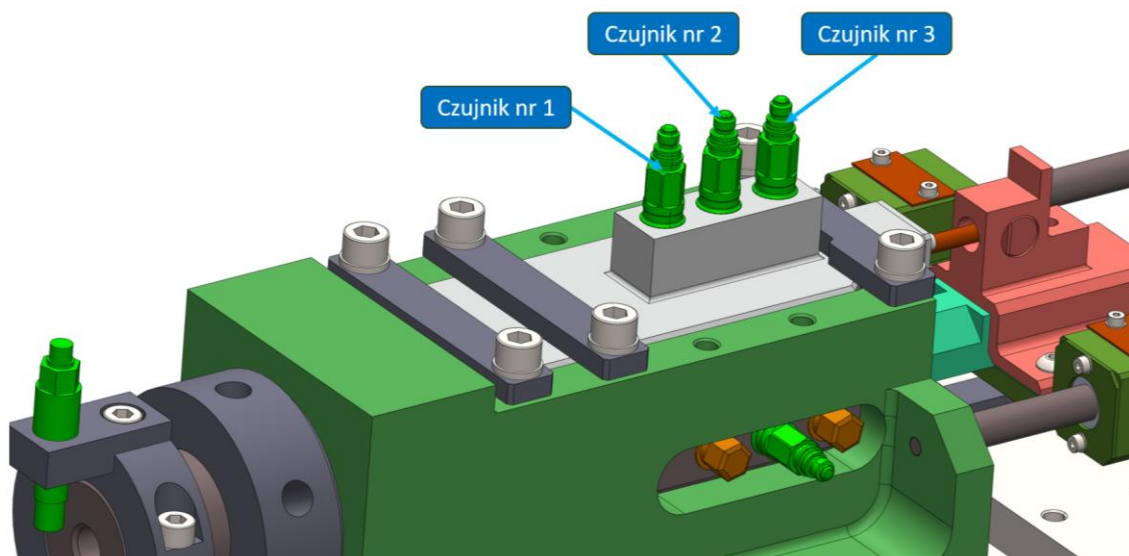
Przy opracowywaniu planu doświadczenia, uwzględniając wnioski z badań przeprowadzonych zgodnie z Metodykami nr 2 i nr 3 „Programu badań”, wykorzystano otwór gazowy umieszczony 36,5 mm od płasku wlotowego lufy. Miało to związek

ze stosunkowo dużymi błędami pomiarowymi oraz przedstawianiem się fragmentów płaszcza pocisków do komory gazowej przy konfiguracjach stanowiska laboratoryjnego, w których otwór gazowy umieszczono 21,5 mm od płasku wlotowego lufy. Z kolei wykorzystanie otworu umieszczonego w odległości 51,5 mm mogło nie zapewnić odpowiedniego ciśnienia gazów prochowych. Masę zespołu odrzucanego również ustalono w konfiguracji pośredniej (dla wartości unormowanej równej 0). Średnicę i długość tłoczyska zestawiono w konfiguracji zapewniającej największą objętość komory gazowej ($X_4 = -1$ oraz $X_5 = 1$).



Rys. 8.1. Przekrój wkrętki z otworem w kształcie dyszy o średnicy przekroju krytycznego 1,0 mm

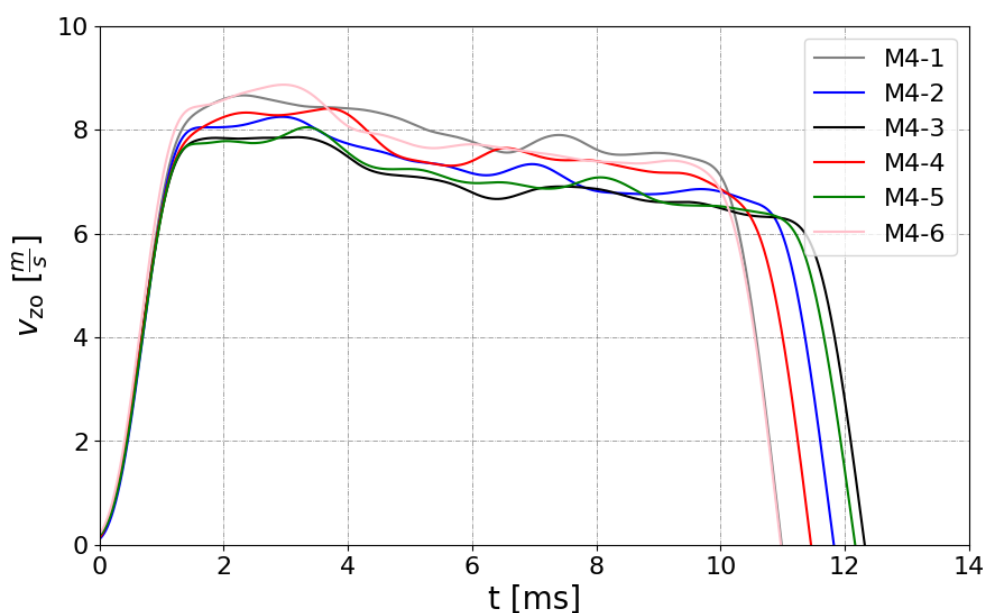
Do pomiaru ciśnienia w komorze gazowej stanowiska laboratoryjnego wykorzystano trzy piezoelektryczne przetworniki ciśnienia, które zamontowano w miejscach przedstawionych na rys. 8.2. Czujnik nr 2 umieszczono w osi otworu gazowego, natomiast czujniki nr 1 i nr 3 – w miejscach oddalonych od czujnika nr 2 o 15 mm (odpowiednio na lewo i na prawo).



Rys. 8.2. Miejsce zamontowania trzech czujników ciśnienia w komorze gazowej stanowiska laboratoryjnego

8.1.1. Wpływ geometrii otworu gazowego na prędkość zespołu odrzucanego

Najpierw sprawdzono wpływ geometrii otworu gazowego na prędkość zespołu odrzucanego v_{zo} . Przebiegi prędkości zespołu odrzucanego w funkcji czasu $v_{zo}(t)$ dla poszczególnych konfiguracji stanowiska badawczego (tab. 8.1) zaprezentowano na rys. 8.3. Podobnie jak przy prezentacji wcześniejszych wyników, na rysunku tym przedstawiono reprezentatywne przebiegi wybrane z wykonanych prób dla danych konfiguracji.



Rys. 8.3. Przykładowe przebiegi prędkości zespołu odrzucanego v_{zo} w funkcji czasu t dla poszczególnych konfiguracji stanowiska badawczego

Maksymalne wartości prędkości zespołu odrzucanego v_{zomax} wraz z obliczoną średnią arytmetyczną \bar{z} i odchyleniem standardowym próbki $S(z)$ dla każdej z konfiguracji stanowiska przedstawiono w tab. 8.2.

Tab. 8.2. Maksymalne wartości prędkości zespołu odrzucanego wraz z obliczoną średnią \bar{z} i odchyleniem standardowym próbki $S(z)$ dla każdej z konfiguracji stanowiska

Numer konfiguracji	v_{zomax} [m/s]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
M4-1	8,66	9,11	8,82	8,58	8,27	8,47	8,70	8,66	0,26
M4-2	7,82	8,51	8,42	8,25	8,13	8,27	8,20	8,23	0,22
M4-3	8,17	8,00	7,86	7,69	7,76	7,83	7,62	7,85	0,19
M4-4	8,47	8,52	8,33	8,45	8,45	8,41	8,36	8,43	0,07
M4-5	7,68	8,05	8,33	8,09	8,04	8,42	7,86	8,06	0,26
M4-6	8,87	7,78	7,85	7,77	7,92	7,56	7,47	7,89	0,46

W celu sprawdzenia istotności wpływu geometrii otworu gazowego na v_{zomax} w układzie z OZPOG przeprowadzono testy t-Studenta (procedury testu opisano w podrozdziale 2.2). Porównano pary konfiguracji, w których zestawiano wkrętki z otworem o przekroju prostym i w kształcie dyszy, o takich samych średnicach.

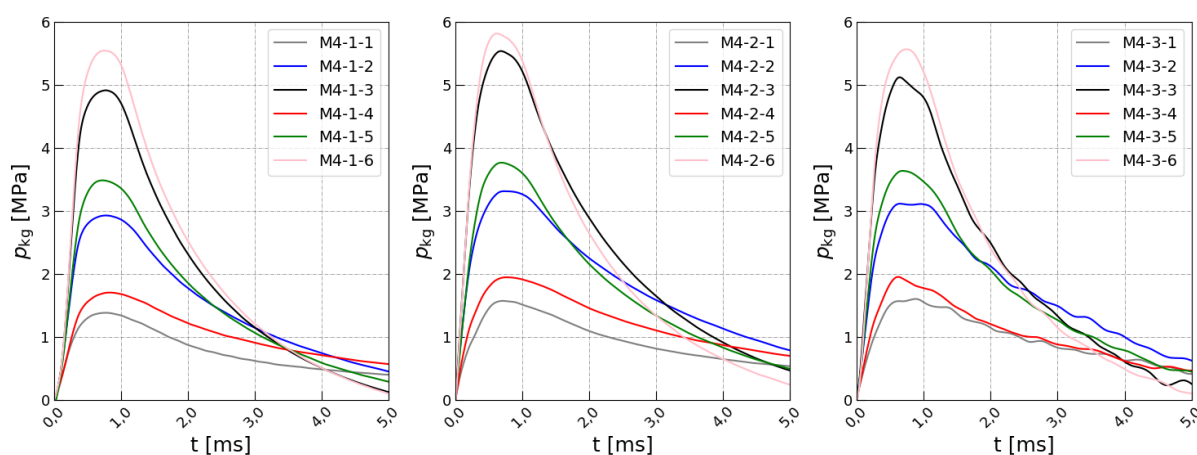
Sformułowano hipotezę zerową: średnie są sobie równe, czyli kształt otworu gazowego nie wpływa w istotny sposób na prędkość zespołu odrzucanego. Dla rozpatrywanej liczby próbek oraz poziomu istotności równego 0,05, T_{kr} dla rozkładu t-Studenta zawiera się w przedziale $(-\infty, -2,18) \cap (2,18, +\infty)$. Z kolei wartość parametru T wyniosła:

- $T = 2,11$ – z porównania konfiguracji M4-1 i M4-4;
- $T = 2,16$ – z porównania konfiguracji M4-2 i M4-5;
- $T = -0,20$ – z porównania konfiguracji M4-3 i M4-6.

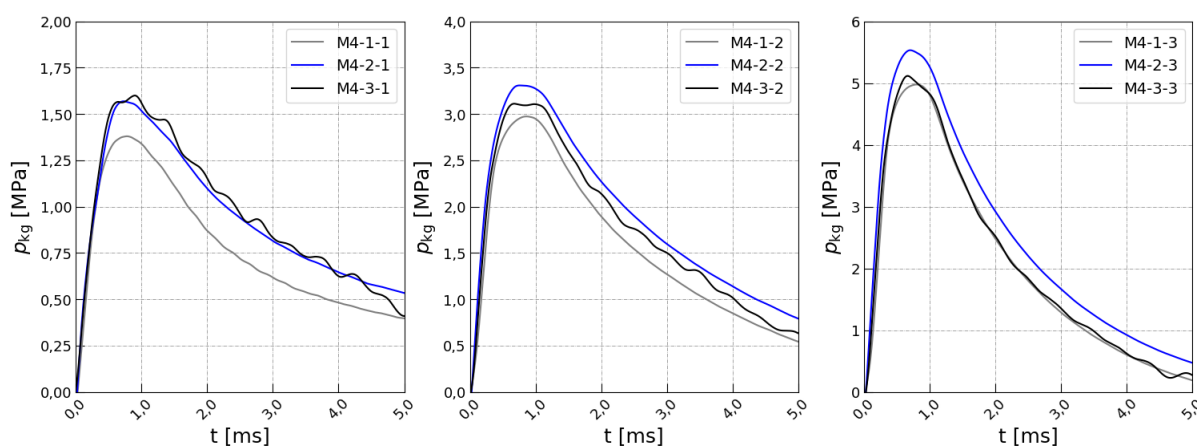
W każdym z przypadków T nie należy do T_{kr} więc można stwierdzić, że hipoteza zerowa jest prawdziwa. Średnie w każdej z rozpatrywanych par są sobie równe, więc geometria otworu gazowego nie wpływa na v_{zomax} . Należy jednak zaznaczyć, że dla par, w których średnica otworu gazowego wynosiła 1,0 mm i 1,4 mm, wartość parametru T była na granicy T_{kr} . Dlatego, zalecane jest wykonanie dodatkowych badań, aby z większą pewnością określić istotność wpływu geometrii otworu gazowego na v_{zomax} .

8.1.2. Wpływ geometrii otworu gazowego na ciśnienie w komorze gazowej

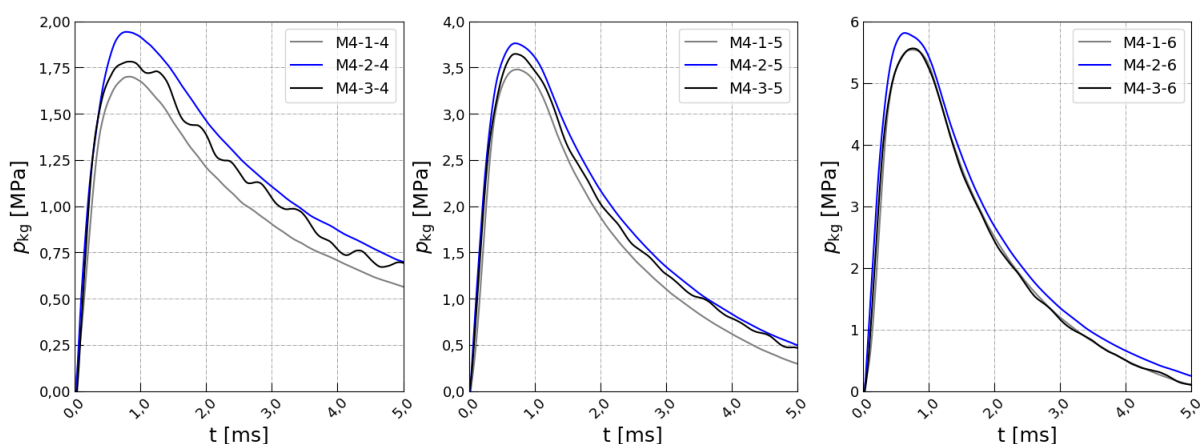
Kolejną sprawdzaną wielkością, na którą mógł mieć wpływ kształt otworu gazowego, było ciśnienie w komorze gazowej p_{kg} . Na rys. 8.4 przedstawiono reprezentatywne przebiegi ciśnienia w komorze gazowej w funkcji czasu $p_{kg}(t)$ dla badanych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego. Na rysunkach zamieszczono informację, którym czujnikiem wykonano dany pomiar, np. M4-2-6 oznacza pomiar wykonany zgodnie z Metodką nr 4, czujnikiem nr 2, w 6-tej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, wynikającej z planu doświadczenia. Z kolei na rys. 8.5 przedstawiono przebiegi $p_{kg}(t)$ dla tych samych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, zmierzone trzema czujnikami umieszczonymi w różnych punktach pomiarowych.



Rys. 8.4. Reprezentatywne przebiegi ciśnienia p_{kg} w komorze gazowej w funkcji czasu t dla poszczególnych badanych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego: z czujnika nr 1 (z lewej), z czujnika nr 2 (w środku), z czujnika nr 3 (z prawej)



Rys. 8.5. Przebiegi ciśnień w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla tych samych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, zmierzone czujnikami umieszczonymi w różnych punktach pomiarowych



Rys. 8.5. c.d. Przebiegi ciśnień w komorze gazowej p_{kg} w funkcji czasu t dla tych samych konfiguracji stanowiska laboratoryjnego, zmierzone czujnikami umieszczonymi w różnych punktach pomiarowych

W tab. 8.3 przedstawiono maksymalne wartości ciśnienia w komorze gazowej p_{kgmax} uzyskane z trzech czujników ciśnienia dla każdej z prób, w każdej z konfiguracji oraz wartości średniej arytmetycznej \bar{z} i odchylenia standardowego próbki $S(z)$.

Tab. 8.3. Maksymalne wartości ciśnienia w komorze gazowej p_{kgmax} z trzech czujników ciśnienia dla każdej z prób, w każdej z konfiguracji oraz wartości średniej arytmetycznej \bar{z} i odchylenia standardowego próbki $S(z)$

Numer konfiguracji	p_{kgmax} [MPa]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
Czujnik ciśnienia nr 1									
M4-1-1	1,20	1,09	1,38	1,53	1,46	1,48	1,12	1,32	0,18
M4-1-2	2,43	2,97	3,13	2,84	2,92	3,02	3,08	2,91	0,24
M4-1-3	4,98	4,91	5,13	4,87	5,11	4,65	4,87	4,93	0,16
M4-1-4	1,56	1,70	1,63	1,83	1,83	1,84	1,87	1,75	0,12
M4-1-5	3,47	3,53	3,37	3,56	3,52	3,48	3,48	3,49	0,06
M4-1-6	5,46	5,56	5,43	5,60	5,59	5,54	5,41	5,51	0,08
Czujnik ciśnienia nr 2									
M4-2-1	1,38	1,25	1,57	1,72	1,68	1,73	1,29	1,52	0,21
M4-2-2	2,69	3,31	3,51	3,23	3,33	3,42	3,58	3,29	0,29
M4-2-3	5,53	5,50	5,75	5,48	5,68	5,34	5,57	5,55	0,13
M4-2-4	1,76	1,94	1,83	2,05	2,07	2,07	2,10	1,98	0,13
M4-2-5	3,74	3,87	3,68	3,86	3,83	3,76	3,83	3,79	0,07
M4-2-6	5,69	5,97	5,81	5,94	5,89	5,81	5,79	5,84	0,10

Tab. 8.3. c.d. Maksymalne wartości ciśnienia w komorze gazowej p_{kgmax} z trzech czujników ciśnienia dla każdej z prób, w każdej z konfiguracji oraz wartości średniej arytmetycznej \bar{z} i odchylenia standardowego próbki $S(z)$

Numer konfiguracji	p_{kgmax} [MPa]							\bar{z}	$S(z)$
	1	2	3	4	5	6	7		
Czujnik ciśnienia nr 3									
M4-3-1	1,33	1,27	1,60	1,76	1,73	1,66	1,26	1,51	0,22
M4-3-2	2,65	3,11	3,23	2,95	2,98	3,16	3,26	3,05	0,21
M4-3-3	5,12	5,04	5,26	5,13	5,27	4,93	5,11	5,12	0,12
M4-3-4	1,63	1,78	1,70	1,95	1,98	1,99	2,05	1,87	0,16
M4-3-5	3,63	3,69	3,41	3,69	3,56	3,65	3,55	3,60	0,10
M4-3-6	5,47	5,61	5,53	5,68	5,59	5,56	5,52	5,56	0,07

Aby określić istotność wpływu geometrii otworu gazowego na p_{kgmax} , sprawdzono, czy pomiary wykonane za pomocą czujników umieszczonych w różnych punktach pomiarowych istotnie różnią się od siebie. Porównano trzy zestawienia wyników: z czujnika nr 1 i z czujnika 2, z czujnika nr 1 i z czujnika nr 3 oraz z czujnika nr 2 i z czujnika nr 3. Średnie arytmetyczne ze wszystkich konfiguracji dla każdego z czujników potraktowano, jako przybliżenie średniej populacji. Przybliżenia te zestawiono ze sobą. Aby sprawdzić, czy wyniki pomiarów z czujników umieszczonych w różnych punktach pomiarowych w komorze gazowej istotnie się różnią, przeprowadzono test istotności t-Studenta. Sformułowano hipotezę zerową: wartości średnich są sobie równe, czyli punkt pomiarowy (miejsce zamontowania czujnika ciśnienia) w komorze gazowej nie wpływa w istotny sposób na wyniki pomiarów. Dla rozpatrywanej liczby próbek oraz poziomu istotności równego 0,05, T_{kr} dla rozkładu t-Studenta zawiera się w przedziale $(-\infty, -2,23) \cup (2,23, +\infty)$. Z kolei wartość parametru T wyniosła:

- $T = -3,68$ – dla czujników nr 1 z nr 2;
- $T = -1,47$ – dla czujników nr 1 z nr 3;
- $T = 2,20$ – dla czujników nr 2 z nr 3.

Porównując wyniki pomiarów z czujników nr 1 i nr 3 oraz nr 2 i nr 3 parametr T nie należy do T_{kr} , dlatego można stwierdzić, że hipoteza zerowa jest prawdziwa. Porównując wyniki pomiarów z czujników nr 1 i nr 2 (parametr T należy do T_{kr}), można stwierdzić, że hipoteza zerowa nie jest prawdziwa. Prowadzi to do pewnej logicznej sprzeczności. Jeżeli wyniki z czujnika nr 1 nie różnią się istotnie od wyników z czujnika

nr 3, a wyniki z czujnika nr 2 nie różnią się istotnie od wyników z czujnika nr 3, to wyniki z czujnika nr 1 nie powinny się istotnie różnić od wyników z czujnika nr 2. Należy zaznaczyć, że parametr T dla porównania wyników z czujników nr 2 i nr 3 ma wartość na granicy T_{kr} . Po uwzględnieniu wniosków z powyższej analizy można stwierdzić, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy pomiarami wykonanymi za pomocą czujnika nr 1 i nr 3. Dla zestawień wyników z czujników nr 1 i nr 2 oraz nr 2 i nr 3 nie można jednoznacznie stwierdzić, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy tymi pomiarami.

Wnioski z powyższej analizy spowodowały konieczność oceny istotności wpływu geometrii otworu gazowego na p_{max} oddzielnie dla każdego z czujników. Ocenę istotności przeprowadzono w oparciu o test t-Studenta. Porównano ze sobą wyniki dla konfiguracji, w których średnica otworu gazowego była taka sama, a zmieniała się tylko jego geometria. Sformułowano hipotezę zerową: wartości średnich są sobie równe, czyli geometria otworu gazowego nie wpływa w sposób istotny na ciśnienie w komorze gazowej. Dla rozpatrywanej liczby próbek oraz poziomu istotności równego 0,05, wartość T_{kr} dla rozkładu t-Studenta zawiera się w przedziale $(-\infty, -2,18) \cap (2,18, +\infty)$. W tab. 8.4 przedstawiono obliczoną wartość parametru T dla wszystkich sprawdzanych zestawień wyników.

Tab. 8.4. Zestawienie wartości parametrów T dla porównywanych konfiguracji

Wyszczególnienie	Czujnik nr 1			Czujnik nr 2			Czujnik nr 3		
	Porównywane konfiguracje	M4-1-1 M4-1-4	M4-1-2 M4-1-5	M4-1-3 M4-1-6	M4-2-1 M4-2-4	M4-2-2 M4-2-5	M4-2-3 M4-2-6	M4-3-1 M4-3-4	M4-3-2 M4-3-5
Wartość parametru T	-4,85	-5,69	-7,96	-4,53	-4,11	-4,37	-3,18	-5,78	-7,81

W każdym ze sprawdzanych zestawień parametr T należy do T_{kr} . Można więc stwierdzić, że hipoteza zerowa nie jest prawdziwa. Wartości średnich nie są sobie równe, czyli nie można jednoznacznie stwierdzić, że geometria otworu gazowego nie wpływa na ciśnienie w komorze gazowej.

8.2. Podsumowanie rozdziału VIII

Analiza statystyczna wpływu geometrii otworu gazowego na prędkość zespołu odrzucanego dała niejednoznaczne wyniki. Test statystyczny w każdym przypadku

wykazał, że geometria otworu gazowego nie ma wpływu na prędkość zespołu odrzucanego. Należy jednak zauważyć, że dla otworów o wymiarach 1,0 mm i 1,4 mm porównywany parametr T był na granicy przedziału krytycznego. Dlatego, nie można jednoznacznie stwierdzić, że geometria otworu gazowego nie wpływa istotnie na prędkość zespołu odrzucanego. Dla otworu gazowego o średnicy 1,8 mm, konstrukcja wkrętki powodowała zmniejszenie udziału geometrii dyszy w przekroju wkrętki. Mogło to prowadzić do zaniku efektu działania dyszy. Aby jednoznacznie określić wpływ geometrii otworu gazowego na prędkość zespołu odrzucanego należałoby przeprowadzić dodatkowe badania.

Przed sprawdzeniem wpływu geometrii otworu gazowego na ciśnienie w komorze gazowej, analizie poddano wpływ wyboru punktu pomiarowego na wynik pomiaru w tej komorze. Można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że pomiar wykonany za pomocą dwóch czujników ciśnienia odsuniętych symetrycznie o 15 mm (jeden w lewo, drugi w prawo) od osi środkowego otworu gazowego jest tożsamy. Nie można jednak stwierdzić tego samego, porównując poszczególne wyniki z tych czujników z wynikami czujnika znajdującego się w osi otworu gazowego lufy.

Analiza statystyczna pozwala z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że geometria otworu gazowego wpływa na ciśnienie w komorze gazowej. Biorąc pod uwagę wszystkie wnioski z badań wykonanych zgodnie z Metodką nr 4 „Programu badań”, można rozważać stosowanie otworów gazowych o kształcie innym niż prosty (walcowy) do zmiany charakteru działania układu z OZPOG.

Strona celowo zostawiona pusta

PODSUMOWANIE

Głównym celem naukowym rozprawy doktorskiej pt. „**Badania doświadczalne układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie**” było przeprowadzenie badań doświadczalnych układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, których wyniki umożliwiłyby walidację modelu matematycznego pracy tego układu oraz poznanie odpowiedzi układu na zmianę wybranych jego parametrów konstrukcyjnych.

Tematyka rozprawy ma duże znaczenie praktyczne, gdyż poznanie odpowiedzi układu na zmianę wybranych parametrów konstrukcyjnych może pozytywnie wpłynąć na realizację procesu projektowania i konstruowania nowych typów uzbrojenia wykorzystujących tę zasadę działania. Jest to bardzo ważne z co najmniej z trzech powodów. Po pierwsze – zapotrzebowanie wojska i służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo państwa na nowoczesną broń strzelecką wzrasta, a powodem tego są trwające liczne konflikty zbrojne na świecie. Po drugie – broń strzelecka będzie nadal dynamicznie rozwijała się zarówno w Polsce, jak i w innych krajach, stąd istnieje potrzeba doskonalenia procesów projektowania i eksploatacji broni przy aktywnym udziale polskiego przemysłu obronnego. Po trzecie – Siły Zbrojne RP i polskie formacje uzbrojone są konsekwentnie modernizowane technicznie, a dotyczy to również wyposażenia i uzbrojenia indywidualnego polskiego żołnierza i funkcjonariusza. Dlatego pozyskanie nowoczesnej broni strzeleckiej, opracowanej w kraju – w możliwie krótkim czasie i przy rozsądnych nakładach finansowych – z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi projektowych i produkowanej przez polski przemysł obronny jest ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa narodowego i uniezależnienia się od dostawców zagranicznych.

Główny cel naukowy rozprawy doktorskiej osiągnięto, bowiem przeprowadzono badania eksperymentalne układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, wykorzystując przy tym m.in. specjalnie zaprojektowane i wykonane w ramach pracy doktorskiej oryginalne w skali światowej stanowisko laboratoryjne. Wyniki tych badań zostały wykorzystane do skutecznej walidacji modelu matematycznego pracy układu z OZPOG, które przedstawiono w rozprawie

doktorskiej kpt. mgr. inż. Mateusza MORAWSKIEGO [2]. Ponadto, określono odpowiedź układu na jego pięć głównych parametrów konstrukcyjnych. Ze względu na obszerność i złożoność tematu, realizację tego celu podzielono na osiem etapów opisanych w ośmiu rozdziałach dysertacji.

W rozdziale I przeprowadzono analizę stanu wiedzy w obszarze badań automatycznej broni palnej i stanowisk do jej badania. Na jej podstawie stwierdzono, że zasadniczo wykorzystywane są cztery grupy takich stanowisk. Pierwsza grupa pozwala na badanie broni strzeleckiej bez konieczności wprowadzania w niej żadnych modyfikacji. Aby prowadzić badania broni na stanowiskach z drugiej grupy, należy wprowadzić w niej pewne modyfikacje, które nie są trwałe (są odwracalne). Kolejna grupa stanowisk laboratoryjnych wymaga trwałego zmodyfikowania broni przed badaniami. Ostatnia, czwarta grupa obejmuje stanowiska laboratoryjne, które nie bazują na konkretnej broni, a zostały specjalnie zaprojektowane i wykonane do pomiaru lub obserwacji pożądaných parametrów i zjawisk. Każda z tych grup stanowisk laboratoryjnych ma swoje wady i zalety. Analiza w tym zakresie wykazała, że do przeprowadzenia badań przewidzianych w niniejszej pracy doktorskiej, niezbędne będzie zaprojektowanie i wykonanie specjalistycznego stanowiska laboratoryjnego, dedykowanego badaniom, mającym na celu dostarczenie wyników niezbędnych do zwalidowania modelu matematycznego pracy układu z OZPOG.

Ponadto, w rozdziale I przeprowadzono analizę literatury w zakresie badań amunicji strzeleckiej. Analiza ta dotyczyła badań dwóch parametrów – ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy oraz prędkości pocisku na torze lotu. Stwierdzono, że w Europie najczęściej wykonuje się pomiary ciśnienia w przewodzie lufy wykorzystując dwa tzw. standardy – CIP i NATO EPVAT. Na podstawie analizy, do dalszych prac wybrano standard CIP, jako adekwatny do prowadzenia badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. Z kolei, analiza metod określania prędkości pocisku na torze lotu pozwoliła na wybranie urządzenia pomiarowego (tj. bramki optoelektronicznej), jak i odległości na jakiej (względem wylotu lufy) to urządzenie będzie usytuowane.

W rozdziale I analizie poddano również zagadnienia związane z metodami planowania eksperymentu DoE. Stwierdzono, że w przypadku badań broni i amunicji, które są stosunkowo kosztowne i czasochłonne, zastosowanie DoE ma tę zaletę, że pozwala ograniczyć liczbę badanych konfiguracji obiektu przy zachowaniu zdolności do jego kompletnego opisu. Ponadto, narzędzia DoE umożliwiają wykonanie

kompleksowej analizie statystycznej wyników badań pod kątem oceny wpływu wielkości wejściowych na odpowiedź obiektu badań. Stwierdzono również, że w ogólnodostępnej literaturze przedmiotu brakuje opisów wykorzystania DoE w dziedzinie projektowania i badania broni, w tym strzeleckiej.

W rozdziale II zaprezentowano badania charakterystyk balistycznych amunicji pistoletowej PARA i charakterystyk dynamicznych broni działającej na zasadzie OZPOG. Wyniki przeprowadzonych badań charakteryzowały się dużą powtarzalnością i dostarczyły rzetelnych danych potrzebnych w procesie projektowania stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG.

W rozdziale III opisano oryginalną modyfikację układu konstrukcyjnego broni działającej na zasadzie OZPOG. Opracowana modyfikacja znacząco rozszerza możliwość zastosowania tego układu do praktycznie każdego rodzaju automatycznej broni strzeleckiej i może uczynić go konkurencyjnym dla najczęściej obecnie wykorzystywanego w karabinkach układu z odprowadzeniem części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie.

W rozdziale IV przedstawiono konstrukcję i funkcjonalność zaprojektowanego stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG. Ponadto, opracowano projekt i dokumentację konstrukcyjną tego stanowiska. Dokumentacja ta była podstawą do wykonania jego części i zespołów w Fabryce Broni „Łucznik”-Radom Sp. z o.o. i firmie Prototypa. Po zmontowaniu stanowiska w Laboratorium Systemów Uzbrojenia ZAU ITU WML WAT, przeprowadzono jego testy strzelaniem, które ujawniły konieczność wprowadzenia ponad 20 zmian konstrukcyjnych. Miały one na celu zapewnienie poprawnej i bezawaryjnej pracy stanowiska laboratoryjnego podczas badań.

W rozdziale V zaprezentowano badania eksperymentalne amunicji docelowej wykorzystanej do badań układu automatyki broni z OZPOG. W czasie badań stwierdzono m.in., że amunicja pozyskana do badań na stanowisku laboratoryjnym charakteryzuje się dużą powtarzalnością parametrów masowych i charakterystyk balistycznych. Określono również, parametry elaboracji amunicji, która posłużyła do określenia wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego.

Ponadto stwierdzono, że zmiana siły potrzebnej do rozcalania naboju podczas strzału może mieć wpływ na jej charakterystyki balistyczne.

W rozdziale VI opisano badania zasadnicze broni działającej na zasadzie OZPOG na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku laboratoryjnym. Celem badań było pozyskanie rzetelnych danych, które posłużyły do zakończonego sukcesem zwalidowania modelu matematycznego, przedstawionego w [2], oraz poznanie odpowiedzi układu na zmianę wybranych parametrów konstrukcyjnych. Badania dowiodły, że wprowadzone zmiany modyfikacyjne stanowiska laboratoryjnego pozytywnie wpłynęły na jego skuteczne i bezawaryjne działanie. Wnioski wyciągnięte z analizy statystycznej wyników badań umożliwiły określenie poziomu wpływu poszczególnych parametrów wejściowych na działanie tego typu układów konstrukcyjnych. Sformułowano również wnioski, które mogą mieć duże znaczenie praktyczne przy implementacji układu z OZPOG do różnych odmian broni strzeleckiej. Dotyczą one m.in. zjawiska znacznego (nawet 8%) spadku prędkości pocisku na torze lotu przy niektórych konfiguracjach obiektu.

W rozdziale VII przedstawiono badania mające na celu określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układów z OZPOG. Na ich podstawie stwierdzono między innymi, że różnica ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy wynosząca około 13,5% nie wpływa w sposób istotny na prędkość zespołu odrzucanego układu, ale może istotnie wpływać na wartość maksymalnego ciśnienia w komorze gazowej. Ponadto stwierdzono, że zmodyfikowany układ z OZPOG z dużym prawdopodobieństwem będzie działał stabilnie przy wykorzystaniu różnych typów amunicji, które mogą charakteryzować się odmiennymi parametrami balistycznymi.

W rozdziale VIII opisano badania wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego. Na podstawie analizy statystycznej wyników tych badań, z dużym prawdopodobieństwem stwierdzono, że geometria otworu gazowego wpływa na ciśnienie w komorze gazowej i można rozważyć stosowanie otworów gazowych o kształcie innym niż prosty (walcowy) do zmiany charakterystyk pracy układu z OZPOG.

Biorąc pod uwagę wszystkie zrealizowane etapy pracy doktorskiej, można sformułować następujące główne wnioski:

- w oparciu o opracowane, oryginalne stanowisko laboratoryjne przeprowadzono obszerne badania doświadczalne pracy układu z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie, których wyniki posłużyły do pozytywnego zwalidowania modelu matematycznego pracy tego układu (przedstawionego w [2]) oraz dostarczyły informacji na temat charakteru jego odpowiedzi na zmianę wybranych parametrów konstrukcyjnych;
- zaproponowana modyfikacja konstrukcyjna układu z OZPOG skutecznie zmniejsza maksymalną prędkość zespołu odrzucanego (w porównaniu z układem z zamkiem swobodnym);
- opracowana modyfikacja układu z OZPOG rozszerza możliwość jego zastosowania do praktycznie każdego typu broni strzeleckiej, zwłaszcza karabinków i karabinów;
- przebadany na stanowisku laboratoryjnym układ konstrukcyjny z OZPOG charakteryzuje się wysoką powtarzalnością uzyskiwanych maksymalnych wartości prędkości zespołu odrzucanego, przy stosunkowo dużych różnicach w maksymalnych wartościach ciśnienia mierzonych w komorze gazowej. Świadczy to o tym, że układ tego typu będzie działał stabilnie, nawet przy stosowaniu amunicji o mało powtarzalnych parametrach balistycznych.

W ocenie autora, najważniejszymi i oryginalnymi osiągnięciami niniejszej rozprawy doktorskiej są:

- wyniki badań eksperymentalnych, które były podstawą do pozytywnego zwalidowania modelu matematycznego pracy układu z OZPOG (rozdział VI);
- określenie odpowiedzi układu z OZPOG na zmianę jego wybranych parametrów konstrukcyjnych (rozdziały VI i VIII) i charakterystyk balistycznych amunicji (rozdział VII);
- zaprojektowane i wykonane oryginalne w skali światowej stanowisko laboratoryjne zawierające układ z OZPOG, szczegółowo scharakteryzowane w rozdziale IV. Stanowisko to jest chronione patentem polskim PL 247883 (data zgłoszenia: 15.09.2022 r., data publikacji o zgłoszeniu: 18.03.2024 r., data udzielenia patentu: 20.06.2025 r.). Udział autora niniejszej dysertacji w patencie wynosi 75%;
- zmodyfikowany układ konstrukcyjny z zamkiem półswobodnym opóźnianym gazodynamicznie (rozdział III) oraz potwierdzenie jego skutecznego działania

(rozdział VI). Modyfikacja ta pozwala na wykorzystanie tego typu rozwiązania konstrukcyjnego w broni innej niż tylko klasyczne pistolety samopowtarzalne;

- zastosowanie w badaniach metod planowania eksperymentu, które nie są powszechnie wykorzystywane w Polsce i na świecie w procesie projektowania i konstruowania broni palnej. Metody te, scharakteryzowane w podrozdziale 1.3, a wykorzystane w rozdziałach VI i VII mają wiele zalet, w tym m.in. pozwalają na znaczne ograniczenie czasochłonności i kosztochłonności prowadzenia badań, przy zachowaniu pożądanej jakości uzyskanych wyników badań.

Dalsze prace w przedmiotowej dziedzinie powinny być ukierunkowane zwłaszcza na:

- wykonanie badań układu z OZPOG, mających na celu sprawdzenie innych rodzajów uszczelnień tłoka gazowego oraz tłoczyska;
- przeprowadzenie analizy sił działających na podstawie stanowiska laboratoryjnego podczas strzału w zależności od jego konfiguracji;
- wykonanie analiz, mających na celu zoptymalizowanie układu konstrukcyjnego z OZPOG w granicach zmienności parametrów zwalidowanego modelu matematycznego;
- eksperymentalne wyznaczenie sił oddziaływania pocisku z lufą podczas strzału w warunkach dynamicznych;
- praktyczne zastosowanie zmodyfikowanego układu konstrukcyjnego z OZPOG w broni strzeleckiej oraz przeprowadzenie badań tej broni.

Wartym podkreślenia jest fakt, że częściowe wyniki prac opisanych w niniejszej dysertacji zostały zaprezentowane w sześciu referatach wygłoszonych na międzynarodowych kongresach, konferencjach i sympozjach naukowych. Są to:

- B. Fikus, D. Goździk, M. Morawski, *Investigations of 9x19 mm round disassembly force and its influence on interior ballistics*, „Materiały konferencyjne XIV Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 19-22.09.2022 r., Wydawca: Wojskowa Akademia Techniczna, streszczenie str. 124.
- D. Goździk, M. Zahor, R. Woźniak, M. Morawski, *Laboratory stand for experimental researches of blowback operation firearm systems*, „Materiały

konferencyjne XIV Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 19-22.09.2022 r., Wydawca: Wojskowa Akademia Techniczna, streszczenie str. 135.

- M. Morawski, D. Goździk, D. Szupieńko, R. Woźniak, M. Zahor, R. Trębiński, B. Fikus, J. Kijewski, J. Bożejko, *Badania teoretyczne i doświadczalne broni działającej na zasadzie odrzutu*, „Materiały konferencyjne XIV Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 19-22.09.2022 r., Wydawca: Wojskowa Akademia Techniczna, streszczenie str. 185.
- D. Goździk, M. Morawski, R. Woźniak, M. Zahor, R. Trębiński, *Preliminary results of investigations of the gas-delayed blowback operation firearm system using newly developed experimental stand*, „Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics”, October 16-20, 2023, Bruges, Belgium.
- J. Bożejko, D. Cichy, W. Furmanek, B. Fikus., D. Goździk, W. Koperski, J. Kijewski, Z. Leciejewski, M. Morawski, Z. Surma, D. Szupieńko, R. Trębiński, R. Woźniak, M. Zahor, *Developing experimental methods and simulation tools to support weapon design process*, „Materiały kongresowe I Międzynarodowego Kongresu Uzbrojeniowego”, Kraków, 21-25.10.2024 r., Wydawca: Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, streszczenie str. 92.
- J. Bożejko, D. Cichy, W. Furmanek, B. Fikus, D. Goździk, W. Koperski, J. Kijewski, P. Kupidura, Z. Leciejewski, J. Michalski, M. Morawski, K. Piasta, Z. Surma, D. Szupieńko, R. Trębiński, R. Woźniak, M. Zahor, *Results of the completed university research grant no. 829/2023/WAT*, „Materiały kongresowe I Międzynarodowego Kongresu Uzbrojeniowego”, Kraków, 21-25.10.2024 r., Wydawca: Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, streszczenie str. 94.

Niezwykle cennym wynikiem rozprawy doktorskiej jest również zaprojektowane, wykonane i zainstalowane w Laboratorium Systemów Uzbrojenia ZAU ITU WML WAT unikatowe, oryginalne stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG. Stanowisko to będzie wykorzystywane w procesie projektowania i badania nowych rozwiązań elementów automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG. Znajdą one zastosowanie w nowoczesnych konstrukcjach broni strzeleckiej, które będą opracowywane w ITU

WML WAT we współpracy z zakładami, wchodzącymi w skład Polskiej Grupy Zbrojeniowej S.A. Ponadto stanowisko laboratoryjne będzie wykorzystywane w procesie dydaktycznym studentów cywilnych i wojskowych kształcących się na kierunku „mechatronika” w specjalnościach związanych z uzbrojeniem.

Należy podkreślić, że dysertacja doktorska pt. **„Badania doświadczalne układu automatyki broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie”** jest efektem moich prac badawczych w obszarze badań teoretycznych i doświadczalnych broni działającej na zasadzie odrzutu zamka, które realizowałem w Szkole Doktorskiej Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w latach 2020-2025. Prace w tym obszarze prowadziłem równolegle, w ścisłej współpracy z kpt. mgr. inż. Mateuszem MORAWSKIM, który wykonał pracę doktorską pt. „Opracowanie i walidacja modelu działania układu automatyki broni z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie. Z tego miejsca serdecznie dziękuję Panu kpt. mgr. inż. Mateuszowi MORAWSKIEMU za owocną merytoryczną i organizacyjną współpracę w dziele rozwoju nowoczesnych metod projektowania broni działającej na zasadzie OZPOG.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Goździk, M. Morawski, *Badania teoretyczne i doświadczalne broni działającej na zasadzie odrzutu zamka*, WAT, Warszawa, 2025 (praca niepublikowana, dostępna w Szkole Doktorskiej WAT oraz w ITU WML WAT).
- [2] M. Morawski, *Opracowanie i walidacja modelu działania układu automatyki broni z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2025.
- [3] *Priorytetowe kierunki badań naukowych w resorcie obrony narodowej na lata 2021-2035*, załącznik do Decyzji Nr 2/Din Ministra Obrony Narodowej z dnia 10 stycznia 2023 r., Departament Innowacji MON, Warszawa 2023.
- [4] Polska norma PN-V-01016:2004, *Broń strzelecka. Terminologia*, Warszawa, lipiec 2004.
- [5] H. Głowicki, S. Niezgodzki, S. Torecki, *Budowa i eksploatacja broni lufowej i amunicji. Część II. Budowa automatycznej broni strzeleckiej*, WAT, Warszawa, 1987.
- [6] R. Woźniak, M. Zahor, *Współczesna broń strzelecka według zasady działania (1)*, „Broń i Amunicja”, nr 3, 2003.
- [7] M. Morawski, M. Zahor, *Delayed Blowback Operation Firearms in the Small Arms Classification*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Rok 2021, Tom 12, Nr 1, str. 101-118.
- [8] M. Morawski, M. Zahor, *Broń działająca na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego w systematyce broni strzeleckiej*, „Materiały pokonferencyjne XIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. *Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa*”, Warszawa, 21-24.09.2020 r., WAT, streszczenie str. 45.
- [9] B. Fikus, *Opracowanie i walidacja modelu broni działającej na zasadzie odrzutu zamka swobodnego*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2018.
- [10] B. Fikus, W. Koperski, P. Płatek, Z. Surma, R. Trębiński, *Experimental investigation of motion of slide of selected pistol types*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa” Vol. 7, nr 4, str. 23-32, 2016.
- [11] D. Szupieńko, *Teoretyczne i doświadczalne badania automatycznej broni palnej działającej na zasadzie odrzutu lufy*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2023.
- [12] D. Szupieńko, R. Woźniak, *Preliminary Physical and Mathematical Model of the Recoil Operated Firearm within the Bolt Recoil Period*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 12, nr 1, str. 59-74, 2022.
- [13] R. Trębiński, Z. Leciejewski, Z. Surma, B. Fikus, D. Szupieńko, *Identification of Experimental Form Function Using Lumped Parameters Interior Ballistics*

Model, „Proceedings of the 32nd International Symposium on Ballistics”, pp. 421-432, Reno, Nevada, 2022.

- [14] D. Szupieńko, B. Fikus, M. Zahor, R. Woźniak, R. Trębiński, *Theoretical and experimental investigations of weapons operating on the principle of recoiling barrel*, „Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics”, pp. 961-973, Bruges, Belgium, 2023.
- [15] *Evaluation procedures for future NATO small arms weapon systems (NATO D/14 Handbook)*, NAAG, LCGDSS, 2018.
- [16] K. Youye, Z. Guidu, X. Changlin, T. Yu, L. Yaohua, C. Huarong, W. Fei, W. Xiaolong, L. Yuedong, *Universal testing device for pistol testing*, Chiny, Patent CN113251857A, 2021.
- [17] Y. Songnian, *Multifunctional gun verification platform*, Chiny, Patent CN113532192A, 2021.
- [18] *B290-UMR Universal Mount for Rifles – Technical Data*, High Pressure Instruments.
- [19] L. Zhongxin, D. Fengwei, W. Zhilin, C. Hongming, X. Wanhe, *Adjustable gun recoil test bench*, Chiny, Patent CN105651109A, 2016.
- [20] S. Jinxiao, *Short gun clamping device*, Chiny, Patent CN109373808A, 2019.
- [21] L. Zhongxin, D. Fengwei, W. Zhilin, C. Hongming, X. Wanhe, *Adjustable pistol recoil test bench*, Chiny, Patent CN105737669A, 2016.
- [22] O. K. Suk, *Displacement measurement device for recoil of firearm*, Korea Południowa, Patent KR101910555B1, 2018.
- [23] L. Heng, L. Tiejiao, H. Min, R. Meng, L. Hongpeng, L. Qianghui, M. Encai, Z. Xiangyu, *Machine gun recoil energy testing device*, Chiny, Patent CN211041932U, 2020.
- [24] *Stand for setting and measuring the trigger resistance of small arms (long guns and hand guns)*, Niemcy, Patent DE3908978A1, 1991.
- [25] V. E. Legros, *Firearm trigger pull measuring device*, USA, Patent US6086375A, 2004.
- [26] <https://www.prototypa.com/refico-f-firing-device> (dostęp: 23.08.2025 r.)
- [27] Ł. Szmit, *Badania teoretyczne i doświadczalne odrzutu, podrzutu i obrotu automatycznej broni strzeleckiej*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2016.
- [28] Z. Surma, Ł. Szmit, S. Torecki, R. Woźniak, *Model matematyczny podrzutu broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 1, nr 2, str. 51-63, 2010.
- [29] Z. Surma, Ł. Szmit, S. Torecki, R. Woźniak, *Niektóre wyniki badań symulacyjnych wpływu charakterystyk konstrukcyjnych karabinka automatycznego na jego odrzut i podrzut*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 2, nr 2, str. 73-84, 2011.
- [30] Ł. Szmit, S. Torecki, *Szczegółowy model matematyczny odrzutu swobodnego broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych*, „Problemy

- Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 3, nr 1, str. 37-50, 2012.
- [31] Ł. Szmit, R. Woźniak, *Specificity of Design and Action of the Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 3, nr 3, str. 29-39, 2012.
- [32] Z. Leciejewski, J. Kijewski, Ł. Szmit, *Preliminary theoretical and experimental studies at the recoil and weapon's jump of the automatic firearms*, „University Review”, Vol. 7, nr 4, str. 38-46, 2013.
- [33] J. Kijewski, Ł. Szmit, *Badania teoretyczno-doświadczalne odrzutu automatycznej broni strzeleckiej*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 4, nr 3, str. 49-65, 2013.
- [34] J. Kijewski, Ł. Szmit, *Badania teoretyczno-doświadczalne podrzutu automatycznej broni strzeleckiej*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 5, nr 4, str. 83-100, 2014.
- [35] Ł. Szmit, J. Kijewski, *Wykorzystanie wyników badań odrzutu i podrzutu automatycznej broni strzeleckiej w procesie doskonalenia karabinków MSBS-5,56*, „Materiały konferencyjne XI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. *Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa*”, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2016.
- [36] A. Jęczmyk, Ł. Szmit, R. Woźniak, *Stanowisko badawcze do badań parametrów odrzutu i/lub podrzutu broni strzeleckiej*, Polska, Patent PL222266B1, 2016.
- [37] R. Trębiński, Z. Leciejewski, J. Kijewski, D. Goździk, D. Szupieńko, *Investigations on influence of rifle automatics system action on values of energetic efficiency coefficient of muzzle brakes*, „Defence Technology”, Vol. 18, nr 10, str. 1741-1747, 2022.
- [38] I. Celmins, *Accuracy and jump measurements od the 5.56-mm M855 Cartridge*, Army Research Laboratory, 2021.
- [39] J. H. Spurk, *The gas flow in gas-operating weapons*, Ballistic Research Laboratories, 1970.
- [40] W. M. Werner, *Comparison of a theoretical and experimental study of the gas system in the M16A1 Rifle*, Ballistic Research Laboratories, 1971.
- [41] H. P. Gay, *Displacement-Time Recorder*, Ballistic Research Laboratories, Raport no. 610, 1946.
- [42] A. Jęczmyk, J. Pawlak, J. Kijewski, R. Woźniak, M. Zahor, *Karabinek do badań optymalizacyjnych węzła gazowego i stanowisko badawcze do badań optymalizacyjnych węzła gazowego broni automatycznej działającej na zasadzie odprowadzenia gazów*, Polska, Patent PL217155B1, 2011.
- [43] G. Leśnik, M. Pac, *Badania teoretyczne i doświadczalne działania mechanizmów broni automatycznej z odprowadzeniem gazów*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 2014.
- [44] G. Leśnik, Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, *Termodynamiczny model działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie*, „Biuletyn WAT”, Vol. LVIII, nr 3, str. 193-209, 2009.

- [45] J. Kijewski, G. Leśnik, *Badania doświadczalne i teoretyczne wpływu średnic otworów wężła gazowego na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów prochowych*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 1, nr 1, str. 55-68, 2010.
- [46] G. Leśnik, S. Torecki, *Badania doświadczalne i teoretyczne wpływu początkowej objętości komory gazowej na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów*, „Problemy Techniki Uzbrojenia”, R. 40, Zeszyt 119, str. 91-98, 2011.
- [47] M. Pac, S. Torecki, *Działanie mechanizmów broni automatycznej z odprowadzeniem gazów po zatrzymaniu tłoka gazowego*, „Problemy Techniki Uzbrojenia”, R. 40, Zeszyt 120, str. 85-92, 2011.
- [48] J. Kijewski, G. Leśnik, M. Pac, *Badania teoretyczne i doświadczalne wpływu sztywności sprężyn powrotnych na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 5, nr 3, str. 107-118, 2014.
- [49] J. Gacek, M. Pac, *Porównawcze badania teoretyczne i doświadczalne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych wężła gazowego na charakterystyki balistyczne i kinematyczne broni automatycznej*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 5, nr 4, str. 101-114, 2014.
- [50] J. Gacek, G. Leśnik, *Badania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki balistyczne i kinematyczne automatycznej broni strzeleckiej z odprowadzeniem gazów. Część I – Przykładowe wyniki badań teoretycznych*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 6, nr 4, str. 41-54, 2015.
- [51] J. Kijewski, G. Leśnik, *Wybrane wyniki badań wpływu średnicy otworu regulacyjnego na pracę mechanizmów broni z odprowadzeniem gazów prochowych*, „Problemy Techniki Uzbrojenia”, Zeszyt 145, nr 1/2018, str. 105-116, 2018.
- [52] A. Jęczmyk, R. Woźniak, M. Pac, S. Torecki, *Stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki karabinka, działającego na zasadzie odprowadzenia gazów*, Polska, Patent PL221029B1, 2011.
- [53] L. Xingyu, W. Yongjuan, Z. He, L. Yue, X. Cheng, *Firearm automaton testing device*, Chiny, Patent CN114963852A, 2022.
- [54] H. Lei, Y. Mo, Z. Kedong, R. Haiyue, L. Qiang, L. Yihui, H. Xuheng, *Firearm unlocking force measuring device*, Chiny, Patent CN116499302A, 2023.
- [55] G. Penghan, S. Zhihua, L. Ye, L. Yongjian, L. Jiaru, Z. Junnuo, C. Jinrong, *Testing device for analyzing influence of key parameters on manipulation comfort of automatic weapon*, Chiny, Patent CN111306986A, 2020.
- [56] NATO Standard AEP-97 *Multi-calibre manual of proof and inspection (M-CMOPI) for NATO small arms ammunition*, Edition A Version 1 October 2020, NATO standardization office (NSO).
- [57] *Measuring pressure in ballistic*, Kistler.

- [58] TDCC – *Tables of dimensions of cartridges and chambers*, C.I.P. https://bobp.cip-bobp.org/en/tdcc_public (dostęp 31.08.2024).
- [59] *Voluntary industry performance standards for pressure and velocity of rimfire sporting ammunition for the use of commercial manufacturers*, SAAMI Z299.1-2018.
- [60] *Voluntary industry performance standards for pressure and velocity of shotshell ammunition for the use of commercial manufacturers*, SAAMI Z299.2-2019.
- [61] *Voluntary industry performance standards for pressure and velocity of centerfire pistol and revolver ammunition for the use of commercial manufacturers*, SAAMI Z299.3-2022.
- [62] *Voluntary industry performance standards for pressure and velocity of centerfire rifle ammunition for the use of commercial manufacturers*, SAAMI Z299.4-2025.
- [63] *Voluntary industry performance standards criteria for evaluation of new firearms designs under conditions of abusive mishandling for the use of commercial manufacturers*, SAAMI Z299.5-2023.
- [64] B. Fikus, Z. Surma, R. Trębiński, *Preliminary application correctness assessment of physical burning law in interior ballistics phenomena modeling in small-caliber guns*, „Proceedings of the 31st International Symposium on Ballistics”, pp. 356–368, Hyderabad, India, 2019.
- [65] D. Goździk, B. Fikus, J. Kijewski, *Comparative analysis of different types of ballistic barrels used in ammunition investigations*, „Biuletyn WAT”, Vol. LXX, No. 1, pp. 31-42, 2021.
- [66] Prezentacja multimedialna pt. *Ballistics. Measuring high pressures in barrels and closed chambers*, Kistler.
- [67] <https://www.prototypa.com/uz-2002-universal-ballistic-breech/> (dostęp: 23.08.2025 r.)
- [68] W. Wiseman, J. Darley, L. Munoz, *Universal receiver test fixture*, USA, Patent US11906259B2, 2021.
- [69] C. Yow, *Ballistic Test Barrels and Related Systems and Methods*, USA, Patent US 2025012551A1, 2024.
- [70] H. Schneider, *TEST SET*, Niemcy, Patent WO2009065482A1, 2009.
- [71] Norma Obronna NO-13-A230:2005/A1:2015, *Pomiar prędkości pocisków. Definicje prędkości i zasady włączania nowego oprzyrządowania do list systemów pomiaru prędkości akceptowanych przez NATO*, Warszawa, kwiecień 2005.
- [72] B. Fikus, D. Goździk, J. Kijewski, *Preliminary Comparative Investigations on Ballistic Properties of Intermediate Cartridges*, „Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa”, Vol. 11, nr 4, str. 27–44, 2020.
- [73] M. Cavazzuti, *Optimization Methods: From Theory to Design*, „Springer-Verlag”, Berlin, Heidelberg, 2013.

- [74] D. Selvamuthu, D. Das, *Introduction to Statistical Methods, Design of Experiments and Statistical Quality Control*, „Springer Nature”, Singapore Pte Ltd. 2018.
- [75] R. A. Fisher, *The arrangement of field experiments*, „Journal of the Ministry of Agriculture”, Vol. 33, pp. 503-515, 1926.
- [76] R. A. Fisher, *The design of experiments*, „Oliver & Boyd”, Edinburgh: Tweeddale Court, London: 33 Paternoster Row, E.C., 1935.
- [77] G. E. P. Box, K. B. Wilson, *On the Experimental Attainment of Optimum Conditions*, „Journal of the Royal Statistical Society”, Series B, Vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- [78] N. M. Bozorg, M. Leclercq, T. Lescot, M. Bazin, N. Gaudreault, A. Dikpati, M. A. Fortin, A. Droit, N. Bertrand, *Design of experiment and machine learning inform on the 3D printing of hydrogels for biomedical applications*, „Biomaterials Advances”, Vol. 153, No. 11, 2023.
- [79] K. Hsueh, T. Lin, M. Lee, Y. Hsiao, Y. Gu, *Design of Experiments for Modeling of Fermentation Process Characterization in Biological Drug Production*, „Processes”, Vol. 10, No. 237, 2022.
- [80] F. Paulo and L. Santos, *Design of experiments for microencapsulation applications: A review*, „Materials Science and Engineering: C”, Vol. 77, No. August, pp. 1327-1340, 2017.
- [81] P. Yu, M. Y. Low and W. Zhou, *Design of experiments and regression modelling in food flavour and sensory analysis: A review*, „Trends in Food Science & Technology”, Vol. 71, No. January, pp. 202-215, 2018.
- [82] D. Granato, V. M. d. A. Calado and B. Jarvis, *Observations on the use of statistical methods in Food Science and Technology*, „Food Research International”, Vol. 55, pp. 137–149, 2014.
- [83] V. L. C. P. Bigão, B. R. B. da Costa, J. Silva, B. S. De Martinis, D. R. Tapia-Blacido, *Use of statistical design of experiments (DoE) in Forensic Analysis: A tailored review*, „Forensic Chemistry”, Vol. 37, 2024.
- [84] S. Costa, M. Barroso, A. Castañera, M. Dias, *Design of experiments, a powerful tool for method development in forensic toxicology: application to the optimization of urinary morphine 3-glucuronide acid hydrolysis*, „Anal Bioanal Chem”, Vol. 396, pp. 2533–2542, 2010.
- [85] H. Bašić, B. Duraković and A. Softić, *Six Sigma Model Testing In Optimizing Medium-Sized Company Production Process*, „Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, Vol. 16, No. 1, pp. 103-106, 2012.
- [86] B. Duraković and H. Bašić, *Textile Cutting Process Optimization Model Based On Six Sigma Methodology In A Medium-Sized Company*, „Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, Vol. 16, No. 1, pp. 107-110, 2012.
- [87] B. Duraković and H. Bašić, *Continuous Quality Improvement in Textile Processing by Statistical Process Control Tools: A Case Study of Medium-*

- Sized Company, „Periodicals of Engineering and Natural Sciences”, Vol. 1, No. 1, pp. 36-46, 2013.
- [88] S. Lamidi, R. Olalere, A. Yekinni, K. Adesina, *Design of Experiments (DOE): Applications and Benefits in Quality Control and Assurance*, „IntechOpen”, 2024.
- [89] R. Djebali, D. Khilifi, M. Ferhi, *Design of Experiments Investigation of Synthetic Jets Cooling Efficiency*, „14th International Renewable Energy Congress (IREC 2023)”, pp. 1-6, Sousse, Tunisia, 2023.
- [90] A. Schlueter and P. Geyer, *Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance*, „Automation in Construction”, Vol. 86, No. February, pp. 33-43, 2018.
- [91] B. Durakovic and M. Torlak, *Simulation and experimental validation of phase change material and water used as heat storage medium in window applications*, „J. of Mater. and Environ. Sci.”, Vol. 8, No. 5, pp. 1837-1746, 2017.
- [92] B. Durakovic and M. Torlak, *Experimental and numerical study of a PCM window model as a thermal energy storage unit*, „International Journal of Low-Carbon Technologies”, Vol. 12, No. 3, p. 272–280, 2017.
- [93] V. Okatia, A. Behzadmehra and S. Farsad, *Analysis of a solar desalinator (humidification–dehumidification cycle) including a compound system consisting of a solar humidifier and subsurface condenser using DoE*, „Desalination”, Vol. 397, No. November, pp. 9-21, 2016.
- [94] A. M. Tîtu, A. V. Sandu, A. B. Pop, S. Tîtu, D. N. Fratila, C. Ceocea, A. Boroiu, *Design of Experiment in the Milling Process of Aluminum Alloys in the Aerospace Industry*, „Applied Sciences”, Vol. 10, No. 6951, 2020.
- [95] S. S. Garud, I. A. Karimi and M. Kraft, *Design of computer experiments: A review*, „Computers & Chemical Engineering”, Vol. 106, No. November, pp. 71-95, 2017.
- [96] T. Grzegorzczak, J. Janiszewski, R. Trębiński, *Metrologia i teoria eksperymentu. Część II*, WAT, Warszawa, 2004.
- [97] M. Korzyński, *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, „Wydawnictwo naukowe PWN”, 2017.
- [98] D. Goździk, M. Zahor, R. Woźniak, M. Morawski, *Stanowisko do badania odrzutu zamka*, Polska, Patent PL 247883, 2025.
- [99] Decyzja Nr 349/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 20 września 2011 r. w sprawie wprowadzenia „Instrukcji w sprawie zarządzania dokumentacją techniczną Uzbrojenia i Sprzętu Wojskowego” oraz „Instrukcji w sprawie określenia wymagań na dokumentację techniczną Uzbrojenia i Sprzętu Wojskowego” (Dz. Urz. Min. Obr. Nar. Nr 19, poz. 287).
- [100] Norma obronna NO-06-A105:2021, *Sprzęt wojskowy – Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań – Ogólne zasady badania prototypów i urządzeń produkowanych seryjnie*, Ministerstwo Obrony Narodowej, 2021.

- [101] R. Trębiński, Z. Leciejewski, Z. Surma, *Wpływ uwzględnienia strat cieplnych na wartości charakterystyk prochów określone w badaniach pirostatycznych*, „Problemy Techniki Uzbrojenia”, Zeszyt 151 nr 3/2019, str. 7-20, 2019.
- [102] R. Trębiński, Z. Leciejewski, Z. Surma, *Modifications of the closed vessel test results analysis method*, „Proceedings of the 31st International Symposium on Ballistics”, Hyderabad, Indie, 4-7.11.2019.
- [103] R. Trębiński, *Ocena istotności współczynników funkcji aproksymującej*, Opracowanie 3/2023, (praca niepublikowana, dostępna w ITU WML WAT).
- [104] M. Morawski, D. Goździk, R. Woźniak, M. Zahor, R. Trębiński, *Investigations of The Gas-Delayed Blowback Operation Firearm System*, artykuł złożony do opublikowania w Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences (18.09.2025 r.)

ZAŁĄCZNIK NR 1
PODSTAWOWE PARAMETRY APARATURY
WYKORZYSTANEJ W BADANIACH

Strona celowo zostawiona pusta

Tab. 1. Podstawowe parametry piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia HPI 5QP6000M

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	bar	0÷6 000
Czułość	pC/bar	2,2
Liniowość	%	≤1
Częstotliwość drgań własnych	kHz	≥200
Czas narastania	μs	≤1
Pojemność elektryczna	pF	1,5

Tab. 2. Podstawowe parametry piezoelektrycznego przetwornika siły Kistler 9321C

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	kN	±14
Czułość	pC/N	-3,7±0,3
Liniowość	%	≤0,5
Częstotliwość drgań własnych	kHz	41,2

Tab. 3. Podstawowe parametry piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia Kistler 6215

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	bar	0÷6 000
Czułość	pC/bar	1,4
Liniowość	%	≤1
Częstotliwość drgań własnych	kHz	≥240
Czas narastania	μs	≤1

Tab. 4. Podstawowe parametry czujnika wylotu AVL 5CP500

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	bar	0÷500
Czułość	pC/bar	200
Liniowość	%	≤1
Częstotliwość drgań własnych	kHz	≥200
Czas narastania	μs	≤1,5

Tab. 5. Podstawowe parametry wzmacniacza ładunku Kistler 5018A1000

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	pC	2÷2 200 000
Niepewność pomiarowa:		
Zakres <10 pC	%	<±2
Zakres <100 pC		<±0,6
Zakres ≥100 pC		<±0,3
Napięcie wyjściowe	V	±10

Tab. 6. Podstawowe parametry rejestratora Kistler 2519

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Liczba kanałów	-	6 (2 wzmacniacze ładunków, 4 kanały napięciowe)
Zakresy pomiarowe (wzmacniacze ładunków)	pC	0÷2 600, 0÷5 200, 0÷10 600, 0÷20 200
Przepustowość (wzmacniacze ładunków)	kHz	10, 20, 40, >100
Błąd pomiarowy (wzmacniacze ładunków)	%	<0,5
Nieliniowość (wzmacniacze ładunków)	%	<0,1
Zakresy pomiarowe (kanały napięciowe)	V	±1, ±2, ±5, ±10
Przepustowość (kanały napięciowe)	kHz	400
Błąd pomiarowy (kanały napięciowe)	%	<1
Nieliniowość (kanały napięciowe)	%	<0,1
Częstotliwość	MHz	max. 10
Przetwornik analogowo-cyfrowy	bit	14

Tab. 7. Podstawowe parametry wzmacniacza ładunku Kistler 5018A1000

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	pC	2÷2 200 000
Niepełność pomiarowa: Zakres <10 pC	%	<±2
Zakres <100 pC		<±0,6
Zakres ≥100 pC		<±0,3
Napięcie wyjściowe	V	±10

Tab. 8. Podstawowe parametry modułu pomiarowego NI 9222

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres sygnału wejściowego	V	±10
Ilość kanałów	-	4
Częstotliwość rejestracji	kS/s/ch	500
Rozdzielczość	bit	16
Błąd pomiarowy	%	±0,02

Tab. 9. Podstawowe parametry bramki optycznej Prototypa LS-01L

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy dla pomiaru prędkości pocisku	m/s	25÷2 500
Dokładność dla pomiaru prędkości pocisku	%	0,2
Zakres pomiarowy dla pomiaru szybkostrzelności	rpm	60÷3 000
Dokładność dla pomiaru szybkostrzelności	%	0,2

Tab. 10. Podstawowe parametry szybkiej kamery termowizyjnej FLIR SC6800

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Typ detektora	-	InSb
Zakres spektralny	µm	3,0÷5,0 lub 1,5÷5,0
Rozdzielczość	px	640x512
Rodzaj chłodzenia detektora	-	CCR
Rozmiar piksela	µm	25
Szybkość klatkowania przy maksymalnej rozdzielczości rejestracji	Hz	565
Maksymalna szybkość klatkowania przy zmniejszonej rozdzielczości rejestracji	Hz	16 404
Rozdzielczość rejestracji przy maksymalnej szybkości klatkowania	px	640x4

Tab. 11. Podstawowe parametry kamery do zdjęć szybkich Phantom v1612

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Maksymalna rozdzielczość rejestracji (rozdzielczość matrycy)	px	1 280x800
Wymiary matrycy	mm	35,8x22,4
Rozmiar piksela	µm	28
Głębina bitowa	bit	12
Minimalny czas ekspozycji	µs	1
Szybkość klatkowania przy maksymalnej rozdzielczości rejestracji	kl./s	16 600
Maksymalna szybkość klatkowania przy zmniejszonej rozdzielczości rejestracji	kl./s	646 000
Rozdzielczość rejestracji przy maksymalnej szybkości klatkowania	px	128x32
Przepustowość przy maksymalnej rozdzielczości rejestracji	Gpx/s	16

Tab. 12. Podstawowe parametry kamery do zdjęć szybkich Phantom v12

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Maksymalna rozdzielczość rejestracji (rozdzielczość matrycy)	px	1 280x800
Rozmiar piksela	µm	20
Głębina bitowa	bit	12
Minimalny czas ekspozycji	µs	1
Szybkość klatkowania przy maksymalnej rozdzielczości rejestracji	kl./s	6 242
Maksymalna szybkość klatkowania przy zmniejszonej rozdzielczości rejestracji	kl./s	680 000
Rozdzielczość rejestracji przy maksymalnej szybkości klatkowania	px	256x16
Przepustowość przy maksymalnej rozdzielczości rejestracji	Gpx/s	10

Tab. 13. Podstawowe parametry uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Thümler Z3

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiaru siły	kN	0÷3
Rozdzielczość pomiaru siły	bit	±17
Dokładność pomiaru siły	%	±0,5
Częstotliwość próbkowania	Hz	50
Rozdzielczość odczytu przesunięcia głowicy	mm	0,001

Tab. 14. Podstawowe parametry wagi RADWAG AS 310.R2

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Obciążenie maksymalne	g	310
Obciążenie minimalne	mg	10
Dokładność odczytu	mg	0,1
Powtarzalność	mg	0,1
Liniowość	mg	±0,3
Czas stabilizacji	s	3,5
Zakres tary	g	-110

Tab. 15. Podstawowe parametry termohigrobarometru LB-715

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiaru temperatury	°C	-40÷85
Niepewność pomiaru temperatury	°C	±0,1
Zakres pomiaru wilgotności: dla temp. Do +40 °C dla temp. Do +70 °C dla temp. Do +80 °C	%	10÷95 10÷60 10÷40
Niepewność pomiaru wilgotności	%	±2
Zakres pomiaru ciśnienia	hPa	800±1
Niepewność pomiaru ciśnienia	hPa	±1

Tab. 16. Podstawowe parametry laserowego czujnika przemieszczenia Micro-Epsilon ILD 1750-750

Wyszczególnienie	J.m.	Parametr
Zakres pomiarowy	mm	750
Początek zakresu pomiarowego	mm	200
Koniec zakresu pomiarowego	mm	950
Powtarzalność	µm	30
Liniowość	%	≤0,09
Częstotliwość pomiaru	kHz	0,3÷7,5

ZAŁĄCZNIK NR 2
PROGRAM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH PRACY
UKŁADU Z ZAMKIEM PÓLSWOBODNYM OPÓŹNIANYM
GAZODYNAMICZNIE

Strona celowo zostawiona pusta

1. Obiekt badań

Obiektem badań jest stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG (zwane dalej „stanowiskiem laboratoryjnym”) wraz z ukompletowaniem, służącym do zmiany jego parametrów konstrukcyjnych.

2. Cel badań

Celem badań jest:

- a) sprawdzenie poprawności działania stanowiska laboratoryjnego;
- b) określenie wpływu miejsca pomiaru ciśnienia na wynik tego pomiaru;
- c) określenie wpływu wymienionych poniżej parametrów na działanie układu automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG:
 - odległość otworu gazowego od czółka zamka;
 - średnica i kształtu otworu gazowego;
 - masa zespołu odrzucanego;
 - średnica tłoczyska;
 - długość tłoczyska;
 - ładunek miotający.
- d) pozyskanie danych umożliwiających walidację modelu matematycznego pracy układu z odrzutem zamka półswobodnego opóźnianego gazodynamicznie.

3. Postanowienia ogólne

- a) Badania zostaną przeprowadzone przez Zespół Badawczy składający się z pracowników Instytutu Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w składzie:
 - kpt. mgr inż. Dawid GOŹDZIK – kierownik Zespołu badawczego;
 - kpt. mgr inż. Mateusz MORAWSKI – zastępca kierownika, sekretarz Zespołu badawczego;
 - prof. dr hab. inż. Radosław TRĘBIŃSKI;
 - dr hab. inż. Ryszard WOŹNIAK, prof. WAT;

- płk dr inż. Mirosław ZAHOR;
 - ppłk dr inż. Jacek KIJEWSKI;
 - ppłk dr inż. Wojciech KOPERSKI;
 - mjr dr inż. Bartosz FIKUS;
 - mgr inż. Damian SZUPIENKO.
- b) Miejsce badań: Zakład Broni i Amunicji (budynek 69) Instytutu Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej.
- c) Czas trwania badań – 12 tygodni.
- d) Termin badań – od 23.01.2023 r. do 21.04.2023 r.

4. Sprawozdawczość

Dokumentację sprawozdawczą z badań stanowi Dziennik badań, który sporządza i prowadzi Zespół badawczy. Dokumentację sprawozdawczą wykonuje się w jednym egzemplarzu.

5. Materiałowo-techniczne zabezpieczenie badań

Wykaz materiałów i wyposażenia technicznego niezbędnego do zabezpieczenia badań stanowiska laboratoryjnego przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wykaz materiałów i wyposażenia technicznego niezbędnego do zabezpieczenia badań stanowiska laboratoryjnego

Lp.	Wyszczególnienie	Ilość
1.	Stanowisko do doświadczalnego badania automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG wraz z wyposażeniem umożliwiającym zmianę parametrów układu	1
2.	Podstawa strzelecka STZA-13	1
3.	Amunicja PARA GECO	300
4.	Amunicja PARA elaborowana prochem RS20	300
5.	Kulochwyt	1
6.	Okulary ochronne	2
7.	Ochronniki słuchu	10
8.	Okablowanie	1

6. Wykaz aparatury pomiarowej

Wykaz aparatury pomiarowej niezbędnej do zabezpieczenia badań stanowiska laboratoryjnego przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Wykaz aparatury pomiarowej niezbędnej do zabezpieczenia badań stanowiska laboratoryjnego

Lp.	Wyszczególnienie	Ilość
1.	Rejestrator Kistler 2519	1
2.	Wzmacniacz ładunku Kistler 5018A1000	2
3.	Przetwornik ciśnienia Kistler 6215	4
4.	Przetwornik siły Kistler 9321C	1
5.	Czujnik wylotu AVL 5CP500	1
6.	Laserowy czujnik przemieszczenia Micro-Epsilon ILD1750-750	1
7.	Bramka optoelektroniczna Prototypa LS-01L	1
8.	Kamera szybka Phantom v1612	1
9.	Szybka kamera termowizyjna FLIR SC6800	1
10.	Kamera GoPro Hero 11	1
11.	Waga analityczna Radwag AS 310.R2	1
12.	Termohigrobarometr LB-715 z panelem odczytowym LB-755	1
13.	Komputer klasy PC	4

7. Zakres badań

Zakres badań stanowiska laboratoryjnego obejmuje pomiar/wyznaczenie następujących wielkości:

- przemieszczenie (droga) zespołu odrzucanego;
- prędkość pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy;
- ciśnienie gazów prochowych w przewodzie lufy;
- ciśnienie gazów prochowych w komorze gazowej;
- siła, z jaką elementy ruchome stanowiska działają na podporę stanowiska;
- chwila wylotu pocisku z lufy.

8. Warunki i tryb wykonywania badań

Badania można rozpocząć po ukazaniu się stosownego punktu w Rozkazie Rektora-Komendanta Wojskowej Akademii Technicznej. W trakcie badań należy zachować warunki bezpieczeństwa oraz ppoż. obowiązujące w miejscu wykonywania badań. Kierownik Zespołu badawczego przed rozpoczęciem badań zobowiązany jest do przeprowadzenia szkolenia dotyczącego bezpiecznego posługiwania się stanowiskiem laboratoryjnym i procedur postępowania w przypadku wystąpienia jego niesprawności.

Dopuszcza się wykonywanie badań według różnych metodyk kolejno po sobie w seriach, jeżeli stanowisko laboratoryjne znajduje się w tej samej konfiguracji. Badania powinny być prowadzone w zbliżonych warunkach środowiskowych. Amunicja do badań musi pochodzić z tej samej partii. Jeżeli na etapie akwizycji wyników zostanie stwierdzony ponadnormatywny rozrzut należy dokonać sprawdzenia poprawności zmontowania stanowiska laboratoryjnego i powtórzyć serię odnotowując ten fakt w Dzienniku badań.

Rodzaje badań do wykonania oraz metodyki im przypisane przedstawiono w tab. 3. Zmianę konfiguracji układu oraz wszystkie czynności podczas prowadzenia badań należy realizować zgodnie z metodykami.

Tab. 3. Rodzaje badań do wykonania oraz metodyki im przypisane

Lp.	Rodzaj badania	Nr metodyki badań
1.	Testowanie stanowiska laboratoryjnego	metodyka nr 1
2.	Zasadnicze badania stanowiska laboratoryjnego	metodyka nr 2
3.	Określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego	metodyka nr 3
4.	Określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego	metodyka nr 4

Wykaz oznaczeń oraz zakres zmian parametrów w stanowisku laboratoryjnym podczas badań przedstawiono w tab. 4.

Tab. 4. Wykaz oznaczeń oraz zakres zmian parametrów w stanowisku laboratoryjnym podczas badań

Oznaczenie	Nazwa parametru	Wartość		
		-1	0	1
X_1	Odległość otworu gazowego od płasku wlotowego lufy [mm]	21,5	36,5	51,5
X_2	Średnica otworu gazowego [mm]	1,0	1,4	1,8
X_3	Masa zespołu odrzucanego [g]	360	390	420
X_4	Średnica tłoczyska [mm]	4	5	6
X_5	Długość tłoczyska [mm]	91	96	101

8.1. Testowanie stanowiska laboratoryjnego

Testowanie stanowiska laboratoryjnego ma na celu:

- sprawdzenie działania mechanizmów i wykrycie ewentualnych niesprawności w ich działaniu (za pomocą kamery szybkiej);
- sprawdzenie szczelności układu opóźnienia gazowego (za pomocą szybkiej kamery termowizyjnej);
- dotarcie lufy (zaokrąglenie ostrych krawędzi występujących w jej przewodzie po wierceniu otworów gazowych);
- porównanie dwóch metod pomiaru przemieszczenia zespołu odrzucanego: za pomocą kamery szybkiej oraz laserowego czujnika przemieszczenia.

Testowanie stanowiska laboratoryjnego należy przeprowadzić zgodnie z metodyką nr 1. Stanowisko laboratoryjne podczas testowania należy zestawić w konfigurację przedstawioną w tab. 5.

Tab. 5. Konfiguracja stanowiska laboratoryjnego podczas testowania

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Liczba strzałów
21,5	1,8	390	5	96	14

8.2. Zasadnicze badania stanowiska laboratoryjnego

Zasadnicze badania stanowiska laboratoryjnego należy wykonać zgodnie z metodyką nr 2. Plan badań opracowano w oparciu o plan Bi, w którym parametr X_5 obliczany jest z relacji generującej, dla kontrastu równego $I = 1$ oraz punktami

gwiazdnymi dla ramienia gwiazdowego równego 1. Plan dla unormowanych wartości wielkości wejściowych przedstawiono w tab. 6.

Tab. 6. Plan badań zasadniczych dla unormowanych wartości wielkości wejściowych

Numer konfiguracji	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
K1	-1	-1	-1	-1	1
K2	1	-1	-1	-1	-1
K3	-1	1	-1	-1	-1
K4	1	1	-1	-1	1
K5	-1	-1	1	-1	-1
K6	1	-1	1	-1	1
K7	-1	1	1	-1	1
K8	1	1	1	-1	-1
K9	-1	-1	-1	1	-1
K10	1	-1	-1	1	1
K11	-1	1	-1	1	1
K12	1	1	-1	1	-1
K13	-1	-1	1	1	1
K14	1	-1	1	1	-1
K15	-1	1	1	1	-1
K16	1	1	1	1	1
K17	-1	0	0	0	0
K18	1	0	0	0	0
K19	0	-1	0	0	0
K20	0	1	0	0	0
K21	0	0	-1	0	0
K22	0	0	1	0	0
K23	0	0	0	-1	0
K24	0	0	0	1	0
K25	0	0	0	0	-1
K26	0	0	0	0	1

Plan badań zasadniczych stanowiska laboratoryjnego z wymiarowymi wartościami zmieniających parametrów przedstawiono w tab. 7.

Tab. 7. Plan badań zasadniczych z wymiarowymi wartościami zmienianych parametrów

Numer konfiguracji	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Liczba strzałów
K1	21,5	1,0	360	4	101	7
K2	51,5	1,0	360	4	91	7
K3	21,5	1,8	360	4	91	7
K4	51,5	1,8	360	4	101	7
K5	21,5	1,0	420	4	91	7
K6	51,5	1,0	420	4	101	7
K7	21,5	1,8	420	4	101	7
K8	51,5	1,8	420	4	91	7
K9	21,5	1,0	360	6	91	7
K10	51,5	1,0	360	6	101	7
K11	21,5	1,8	360	6	101	7
K12	51,5	1,8	360	6	91	7
K13	21,5	1,0	420	6	101	7
K14	51,5	1,0	420	6	91	7
K15	21,5	1,8	420	6	91	7
K16	51,5	1,8	420	6	101	7
K17	21,5	1,4	390	5	96	7
K18	51,5	1,4	390	5	96	7
K19	36,5	1,0	390	5	96	7
K20	36,5	1,8	390	5	96	7
K21	36,5	1,4	360	5	96	7
K22	36,5	1,4	420	5	96	7
K23	36,5	1,4	390	4	96	7
K24	36,5	1,4	390	6	96	7
K25	36,5	1,4	390	5	91	7
K26	36,5	1,4	390	5	101	7
K27	-	-	360	6	101	7
K28	-	-	390	6	101	7
K29	-	-	420	6	101	7

W każdej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego należy wykonać po 7 prób. Dodatkowo, poza planem Bi, w celu określenia wartości odniesienia, do planu dodano

konfiguracje dla różnych mas zespołu odrzucanego przy wyłączonym układzie gazowym, tzn. z zamontowaną wkrętką zamykającą otwór gazowy.

8.3. Określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego

Plan badań dla określenia wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego opracowano w oparciu o plan frakcyjny dwuwartościowy, w którym parametry X_4 i X_5 obliczono z relacji generujących (X_4 dla kontrastu 1, X_5 dla kontrastu -1). Plan badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego dla unormowanych wartości wielkości wejściowych przedstawiono w tab. 8. Badania należy wykonać zgodnie z metodyką nr 3.

Tab. 8. Plan badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego dla unormowanych wartości wielkości wejściowych

Numer konfiguracji	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
M3-1	-1	-1	-1	-1	-1
M3-2	1	-1	-1	1	1
M3-3	-1	1	-1	1	1
M3-4	1	1	-1	-1	-1
M3-5	-1	-1	1	1	-1
M3-6	1	-1	1	-1	1
M3-7	-1	1	1	-1	1
M3-8	1	1	1	1	-1

Plan badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego z wymiarowymi wartościami zmienianych parametrów przedstawiono w tab. 9. Dodatkowo, w celu określenia wartości odniesienia, do planu dodano konfiguracje dla różnych mas zespołu odrzucanego przy wyłączonym układzie gazowym, tzn. z zamontowaną wkrętką zamykającą otwór gazowy.

Tab. 9. Plan badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego z wymiarowymi wartościami zmienianych parametrów

Numer konfiguracji	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Liczba strzałów	Nr z planu zasadniczego
M3-1	21,5	1,0	360	4	91	7	brak
M3-2	51,5	1,0	360	6	101	7	K10

Tab. 9. c.d. Plan badań wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego z wymiarowymi wartościami zmienianych parametrów

Numer konfiguracji	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Liczba strzałów	Nr z planu zasadniczego
M3-3	21,5	1,8	360	6	101	7	K11
M3-4	51,5	1,8	360	4	91	7	brak
M3-5	21,5	1,0	420	6	91	7	brak
M3-6	51,5	1,0	420	4	101	7	K6
M3-7	21,5	1,8	420	4	101	7	K7
M3-8	51,5	1,8	420	6	91	7	brak
M3-9	-	-	360	6	101	7	K27
M3-10	-	-	390	6	101	7	K28
M3-11	-	-	420	6	101	7	K29

8.4. Określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego

Określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego należy wykonać zgodnie z metodyką nr 4. Plan badań dla określenia tego wpływu przedstawiono w tab. 10.

Tab. 10. Plan badań dla określenia wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego

Numer konfiguracji	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Liczba strzałów
M4-1	36,5	1,0	360	4	101	7
M4-2	36,5	1,4	360	4	101	7
M4-3	36,5	1,8	360	4	101	7
M4-4	36,5	1,0 (dysza)	360	4	101	7
M4-5	36,5	1,4 (dysza)	360	4	101	7
M4-6	36,5	1,8 (dysza)	360	4	101	7

9. Wykaz czynności eksploatacyjnych i innych informacji pomocnych przy prowadzeniu badań

W celu zapewnienia powtarzalności pomiarów, zachowania prawidłowego uszczelnienia układu opóźnienia gazowego oraz uniknięcia uszkodzenia

mechanicznego stanowiska badawczego należy wykonać czynności eksploatacyjne wymienione w tab. 11.

Tab. 11. Wykaz czynności eksploatacyjnych niezbędnych do wykonania podczas badań

Czynność	Liczba strzałów
Czyszczenie lufy	21
Czyszczenie komory gazowej	21
Kontrola wizualna stanu uszczelnień układu gazowego	po każdym demontażu
Kontrola stanu dokręcenia tłoczyska	7
Wymiana uszczelnienia tłoczyska	50
Wymiana uszczelnienia komory gazowej	40
Wymiana śrub łączących tłoczysko z zamkiem	170
Kontrola dokręcenia śrub w stanowisku	50
Demontaż, kontrola stanu technicznego i czyszczenie stanowiska	150

W tab. 12÷14 przedstawiono wykazy konfiguracji płytek masowych montowanych na zespole odrzucanym w celu uzyskania jego zakładanej masy.

Tab. 12. Wykaz konfiguracji płytek masowych dla zakładanej masy zespołu odrzucanego równej 360 g

Zakładana masa zespołu odrzucanego = 360 g					
Tłoczysko (średnica/długość)	Masa płytki masowej [g]				Różnica względem masy zakładanej [g]
	1	2	4	8	
	Liczba potrzebnych płytek masowych [szt.]				
6/101	0	0	0	0	-0,3
6/96	1	0	0	0	-0,2
6/91	2	0	0	0	-0,1
5/101	1	0	2	0	-0,3
5/96	1	0	2	0	0,4
5/91	0	1	2	0	0,1
4/101	0	0	0	2	-0,1
4/96	0	0	0	2	0,4
4/91	1	0	0	2	-0,1

Tab. 13. Wykaz konfiguracji płytek masowych dla zakładanej masy zespołu odrzucanego równej 390 g

Zakładana masa zespołu odrzucanego = 390 g					
Tłoczysko (średnica/długość)	Masa płytki masowej [g]				Różnica względem masy zakładanej [g]
	1	2	4	8	
	Liczba potrzebnych płytek masowych [szt.]				
6/101	2	2	2	2	-0,3
6/96	3	2	2	2	-0,2
6/91	0	0	0	4	-0,1
5/101	1	1	1	4	-0,3
5/96	1	1	1	4	0,4
5/91	0	0	2	4	0,1
4/101	2	2	2	4	-0,1
4/96	2	2	2	4	0,4
4/91	3	2	2	4	-0,1

Tab. 14. Wykaz konfiguracji płytek masowych dla zakładanej masy zespołu odrzucanego równej 420 g

Zakładana masa zespołu odrzucanego = 420 g					
Tłoczysko (średnica/długość)	Masa płytki masowej [g]				Różnica względem masy zakładanej [g]
	1	2	4	8	
	Liczba potrzebnych płytek masowych [szt.]				
6/101	0	2	2	6	-0,3
6/96	1	2	2	6	-0,2
6/91	2	2	2	6	-0,1
5/101	1	2	0	8	-0,3
5/96	1	2	0	8	0,4
5/91	2	2	0	8	0,1
4/101	0	2	2	8	-0,1
4/96	0	2	2	8	0,4
4/91	1	2	2	8	-0,1

10. Metodyki

- Metodyka nr 1 – Testowanie stanowiska laboratoryjnego;
- Metodyka nr 2 – Zasadnicze badania stanowiska laboratoryjnego;
- Metodyka nr 3 – Określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układu opóźnienia gazowego;
- Metodyka nr 4 – Określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego.

METODYKA NR 1

TESTOWANIE STANOWISKA LABORATORYJNEGO

1. Cel badań

Celem badań jest sprawdzenie poprawności działania mechanizmów stanowiska laboratoryjnego, szczelności układu opóźnienia gazowego oraz dotarcie przewodu lufy.

2. Sprzęt i wyposażenie

Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów niezbędnych do wykonania badań przedstawiono w pkt. 5 i 6 „Programu badań”.

3. Warunki i tryb wykonywania zadania

3.1. Czas i miejsce prowadzenia badań

Łączny czas wykonania badań zgodnie z metodyką nr 1 wynosi ok. 8 godzin. Badania należy przeprowadzić w miejscu wyznaczonym przez Zespół badawczy.

3.2. Warunki środowiskowe

Badania przeprowadzić w temperaturze $20\pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.3. Wymagania w zakresie kwalifikacji obsługi stanowiska laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań kierownik Zespołu badawczego jest zobowiązany do przeszkolenia członków Zespołu badawczego, będących bezpośrednio zaangażowanych w obsługę stanowiska laboratoryjnego, w zakresie prowadzenia badań, środków bezpieczeństwa podczas ich wykonywania oraz budowy, zasady działania i postępowania w przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska badawczego. Ponadto członkowie Zespołu badawczego są zobowiązani do zapoznania się z niniejszą metodyką.

3.4. Wymagania BHP

Członkowie Zespołu badawczego bezpośrednio zaangażowani w wykonywanie badań podlegają kierownikowi Zespołu badawczego, który przed ich rozpoczęciem udziela instruktażu dotyczącego przestrzegania zasad bezpieczeństwa podczas prowadzenia badań.

4. Szczegółowy sposób przeprowadzenia badań

Kolejność czynności podczas prowadzenia badań:

- 1) Zestawić stanowisko laboratoryjne zgodnie z konfiguracją przedstawioną w tab. 5 „Programu badań”;
- 2) Zestawić układ pomiarowy do pomiaru/wyznaczenia:
 - a) ciśnienia w przewodzie lufy – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do gniazda znajdującego się na wysokości wykorzystywanego otworu gazowego,
 - b) ciśnienia w komorze gazowej – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do środkowego gniazda komory gazowej,
 - c) chwili wylotu pocisku z lufy – czujnik wylotu umieścić w obsadzie czujnika na wylocie lufy,
 - d) sił działających podczas strzału – czujnik siły stanowi integralną część stanowiska laboratoryjnego,
 - e) przemieszczenia zespołu odrzucanego – kamerę szybką ustawić prostopadle do stanowiska laboratoryjnego, obiektyw ustawić na wysokości prowadnic, po których porusza się zespół odrzucany oraz w połowie drogi odrzutu, ostrość ustawić na znacznik znajdujący się na suwadle; laserowy czujnik przemieszczenia umieścić w konstrukcyjnie przewidzianym do tego miejscu,
 - f) prędkości pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy – optoelektryczną bramkę do wyznaczenia prędkości pocisku ustawić środkiem obszaru pomiarowego w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy,
 - g) szczelności układu gazowego – termowizyjną kamerę szybką ustawić prostopadle do stanowiska laboratoryjnego, obiektyw ustawić na wysokości

komory gazowej w połowie jej długości, ostrość ustawić na gniazda czujników znajdujące się na komorze;

- 3) Niewykorzystywane otwory gazowe w lufie zaślepić wkładkami bez otworów przelotowych;
- 4) Niewykorzystywane gniazda pod czujniki w lufie i komorze gazowej zaślepić wkładkami bez otworów przelotowych;
- 5) Sprawdzić wizualnie poprawność zestawienia i stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
- 6) Ustawić i przetestować działanie elektropustu;
- 7) Przygotować stanowisko laboratoryjne do strzału, w tym celu:
 - a) napiąć igliczny mechanizm uderzeniowy,
 - b) wprowadzić bezpiecznik do gniazda bezpiecznika w zamku,
 - c) odciągnąć suwadło w tylne położenie,
 - d) wprowadzić nabój do komory naboju,
 - e) doprowadzić suwadło do przedniego położenia, zaczepiając pazur wyciągu o kryzę łuski,
 - f) usunąć bezpiecznik z gniazda bezpiecznika w zamku;
- 8) Uruchomić system pomiarowy w tryb akwizycji danych;
- 9) Sprawdzić możliwość bezpiecznego oddania strzału;
- 10) Odbezpieczyć elektropust i oddać strzał;
- 11) Zapisać wyniki pomiarów na dysku, nadając im nazwę zgodną z Dziennikiem badań;
- 12) Odnotować wyniki w Dzienniku badań;
- 13) Sprawdzić wizualnie stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
- 14) Pkt. 7÷13 powtórzyć do uzyskania wymaganej liczby prób;
- 15) Po wykonaniu wszystkich prób zdemontować i wyczyścić stanowisko laboratoryjne;
- 16) W przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska laboratoryjnego podczas prowadzenia strzelań, ich usunięcia dokonuje kierownik Zespołu badawczego w oparciu o dokumentację konstrukcyjną stanowiska.

5. Analiza i ocena wyników badań

Oceny wyników badań dokonuje Zespół badawczy. Za pozytywny należy uznać wynik badań wskazujący na poprawne i zgodne z założonym działaniem stanowiska badawczego.

6. Sprawozdawczość

Dokument sprawozdawczy stanowi Dziennik badań, w którym należy ująć:

- datę przeprowadzenia badań;
- wyposażenie pomiarowe i badawcze;
- warunki środowiskowe;
- wyniki badań;
- uwagi dotyczące przebiegu badań.

METODYKA NR 2

ZASADNICZE BADANIA STANOWISKA LABORATORYJNEGO

1. Cel badań

Celem badań jest określenie wpływu: odległości otworu gazowego od czółka zamka, średnicy otworu gazowego, masy zespołu odrzucanego, średnicy tłoczyska i długości tłoczyska na działanie układu automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG.

2. Sprzęt i wyposażenie

Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów niezbędnych do wykonania badań przedstawiono w pkt. 5 i 6 „Programu Badań”.

3. Warunki i tryb wykonywania zadania

3.1. Czas i miejsce prowadzenia badań

Łączny czas wykonania badań zgodnie z Metodyką nr 2 wynosi ok. 10 dni. Badania przeprowadzić w miejscu wyznaczonym przez Zespół badawczy.

3.2. Warunki środowiskowe

Badania przeprowadzić w temperaturze $20\pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.3. Wymagania w zakresie kwalifikacji obsługi stanowiska laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań kierownik Zespołu badawczego jest zobowiązany do przeszkolenia członków Zespołu badawczego, będących bezpośrednio zaangażowanych w obsługę stanowiska laboratoryjnego, w zakresie prowadzenia badań, środków bezpieczeństwa podczas ich wykonywania oraz budowy, zasady działania i postępowania w przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska badawczego. Ponadto członkowie Zespołu badawczego są zobowiązani do zapoznania się z niniejszą metodyką.

3.4. Wymagania BHP

Członkowie Zespołu badawczego bezpośrednio zaangażowani w wykonywanie badań podlegają kierownikowi Zespołu badawczego, który przed ich rozpoczęciem udziela instruktażu dotyczącego przestrzegania zasad bezpieczeństwa podczas prowadzenia badań.

4. Szczegółowy sposób przeprowadzenia badań

Kolejność czynności podczas prowadzenia badań:

- 1) Zestawić stanowisko laboratoryjne zgodnie z pierwszą konfiguracją przedstawioną w tab. 7 „Programu badań”;
- 2) Zestawić układ pomiarowy do pomiaru/wyznaczenia:
 - a) ciśnienia w przewodzie lufy – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do gniazda znajdującego się na wysokości wykorzystywanego otworu gazowego,
 - b) ciśnienia w komorze gazowej – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do dowolnego gniazda, które nie znajduje się na wysokości otworu gazowego,
 - c) chwili wylotu pocisku z lufy – czujnik wylotu umieścić w obsadzie czujnika na wylocie lufy,
 - d) sił działających podczas strzału – czujnik siły stanowi integralną część stanowiska laboratoryjnego,
 - e) przemieszczenia zespołu odrzucanego – laserowy czujnik przemieszczenia umieścić w konstrukcyjnie przewidzianym do tego miejscu,
 - f) prędkości pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy – optoelektroniczną bramkę do wyznaczenia prędkości pocisku ustawić środkiem obszaru pomiarowego w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy,
- 3) Niewykorzystywane otwory gazowe w lufie zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 4) Niewykorzystywane gniazda pod czujniki w lufie i komorze gazowej zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 5) Sprawdzić wizualnie poprawność zestawienia i stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;

- 6) Ustawić i przetestować działanie elektropustu;
- 7) Przygotować stanowisko laboratoryjne do strzału, w tym celu:
 - a) napiąć igliczny mechanizm uderzeniowy,
 - b) wprowadzić bezpiecznik do gniazda bezpiecznika w zamku,
 - c) odciągnąć suwadło w tylne położenie,
 - d) wprowadzić nabój do komory naboowej,
 - e) doprowadzić suwadło do przedniego położenia, zaczepiając pazur wyciągu o kryzę łuski,
 - f) usunąć bezpiecznik z gniazda bezpiecznika w zamku;
- 8) Uruchomić system pomiarowy w tryb akwizycji danych;
- 9) Sprawdzić możliwość bezpiecznego oddania strzału;
- 10) Odbezpieczyć elektropust i oddać strzał;
- 11) Zapisać wyniki pomiarów na dysku nadając im nazwę zgodną z Dziennikiem badań;
- 12) Odnotować wyniki w Dzienniku badań;
- 13) Sprawdzić wizualnie stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
- 14) Pkt. 7÷13 powtórzyć do uzyskania wymaganej liczby prób dla danej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego;
- 15) Wyczyścić zasadnicze elementy stanowiska laboratoryjnego (lufa, komora gazowa);
- 16) Przekonfigurować stanowisko laboratoryjne do kolejnej konfiguracji przewidzianej w planie badań i powtórzyć pkt. 2÷15 (system pomiarowy modyfikować tylko w zakresie wymaganym przez nową konfigurację);
- 17) Po wykonaniu wszystkich prób zdemontować i wyczyścić stanowisko laboratoryjne;
- 18) W przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska laboratoryjnego podczas prowadzenia strzelań, ich usunięcia dokonuje kierownik Zespołu badawczego w oparciu o dokumentację konstrukcyjną stanowiska.

5. Analiza i ocena wyników badań

Oceny wyników badań dokonuje Zespół badawczy. Za pozytywny należy uznać wynik badań, w których uzyskano wyniki prób nieodstające w sposób znaczny od wyników przewidywanych.

6. Sprawozdawczość

Dokument sprawozdawczy stanowi Dziennik badań, w którym należy ująć:

- datę przeprowadzenia badań;
- wyposażenie pomiarowe i badawcze;
- warunki środowiskowe;
- wyniki badań;
- uwagi dotyczące przebiegu badań.

METODYKA NR 3

OKREŚLENIE WPŁYWU ŁADUNKU MIOTAJĄCEGO NA DZIAŁANIE UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO

1. Cel badań

Celem badań jest określenie wpływu ładunku miotającego na działanie układu automatyki broni działającej na zasadzie OZPOG.

2. Sprzęt i wyposażenie

Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów niezbędnych do wykonania badań przedstawiono w pkt. 5 i 6 „Programu Badań”.

3. Warunki i tryb wykonywania zadania

3.1. Czas i miejsce prowadzenia badań

Łączny czas wykonania badań zgodnie z Metodyką nr 3 wynosi ok. 3 dni. Badania przeprowadzić w miejscu wyznaczonym przez Zespół badawczy.

3.2. Warunki środowiskowe

Badania przeprowadzić w temperaturze $20\pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.3. Wymagania w zakresie kwalifikacji obsługi stanowiska laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań kierownik Zespołu badawczego jest zobowiązany do przeszkolenia członków Zespołu badawczego, będących bezpośrednio zaangażowanych w obsługę stanowiska laboratoryjnego, w zakresie prowadzenia badań, środków bezpieczeństwa podczas ich wykonywania oraz budowy, zasady działania i postępowania w przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska badawczego. Ponadto członkowie Zespołu badawczego są zobowiązani do zapoznania się z niniejszą metodyką.

3.4. Wymagania BHP

Członkowie Zespołu badawczego bezpośrednio zaangażowani w wykonywanie badań podlegają kierownikowi Zespołu badawczego, który przed ich rozpoczęciem udziela instruktażu dotyczącego przestrzegania zasad bezpieczeństwa podczas prowadzenia badań.

4. Szczegółowy sposób przeprowadzenia badań

Kolejność czynności podczas prowadzenia badań:

- 1) Zestawić stanowisko laboratoryjne zgodnie z pierwszą konfiguracją przedstawioną w tab. 9 „Programu badań”;
- 2) Zestawić układ pomiarowy do pomiaru/wyznaczenia:
 - a) ciśnienia w przewodzie lufy – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do gniazda znajdującego się na wysokości wykorzystywanego otworu gazowego,
 - b) ciśnienia w komorze gazowej – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do dowolnego gniazda, które nie znajduje się na wysokości otworu gazowego,
 - c) chwili wylotu pocisku z lufy – czujnik wylotu umieścić w obsadzie czujnika na wylocie lufy,
 - d) sił działających podczas strzału – czujnik siły stanowi integralną część stanowiska laboratoryjnego,
 - e) przemieszczenia zespołu odrzucanego – laserowy czujnik przemieszczenia umieścić w konstrukcyjnie przewidzianym do tego miejscu,
 - f) prędkości pocisku w odległości 2 m od wylotu lufy – optoelektroniczną bramkę do wyznaczenia prędkości pocisku ustawić środkiem obszaru pomiarowego w odległości 2 m od płasku wylotowego lufy;
- 3) Niewykorzystywane otwory gazowe w lufie zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 4) Niewykorzystywane gniazda pod czujniki w lufie i komorze gazowej zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 5) Sprawdzić wizualnie poprawność zestawienia i stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;

- 6) Ustawić i przetestować działanie elektropustu;
- 7) Przygotować stanowisko laboratoryjne do strzału, w tym celu:
 - a) napiąć igliczny mechanizm uderzeniowy,
 - b) wprowadzić bezpiecznik do gniazda bezpiecznika w zamku,
 - c) odciągnąć suwadło w tylne położenie,
 - d) wprowadzić nabój do komory naboowej,
 - e) doprowadzić suwadło do przedniego położenia, zaczepiając pazur wyciągu o kryzę łuski,
 - f) usunąć bezpiecznik z gniazda bezpiecznika w zamku;
- 8) Uruchomić system pomiarowy w tryb akwizycji danych;
- 9) Sprawdzić możliwość bezpiecznego oddania strzału;
- 10) Odbezpieczyć elektropust i oddać strzał;
- 11) Zapisać wyniki pomiarów na dysku nadając im nazwę zgodną z Dziennikiem badań;
- 12) Odnotować wyniki w Dzienniku badań;
- 13) Sprawdzić wizualnie stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
- 14) Pkt. 7÷13 powtórzyć do uzyskania wymaganej liczby prób dla danej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego;
- 15) Wyczyścić zasadnicze elementy stanowiska laboratoryjnego (lufa, komora gazowa);
- 16) Przekonfigurować stanowisko laboratoryjne do kolejnej konfiguracji przewidzianej w planie badań i powtórzyć pkt. 2÷15 (system pomiarowy modyfikować tylko w zakresie wymaganym przez nową konfigurację);
- 17) Po wykonaniu wszystkich prób zdemontować i wyczyścić stanowisko laboratoryjne;
- 18) W przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska laboratoryjnego podczas prowadzenia strzelań, ich usunięcia dokonuje kierownik Zespołu badawczego w oparciu o dokumentację konstrukcyjną stanowiska.

5. Analiza i ocena wyników badań

Oceny wyników badań dokonuje Zespół badawczy. Za pozytywny należy uznać wynik badań, w których uzyskano wyniki prób nieodstające w sposób znaczny od wyników przewidywanych.

6. Sprawozdawczość

Dokument sprawozdawczy stanowi Dziennik badań, w którym należy ująć:

- datę przeprowadzenia badań;
- wyposażenie pomiarowe i badawcze;
- warunki środowiskowe;
- wyniki badań;
- uwagi dotyczące przebiegu badań.

METODYKA NR 4

OKREŚLENIE WPŁYWU GEOMETRII OTWORU GAZOWEGO NA DZIAŁANIE UKŁADU OPÓŹNIENIA GAZOWEGO

1. Cel badań

Celem badań jest określenie wpływu geometrii otworu gazowego na działanie układu opóźnienia gazowego.

2. Sprzęt i wyposażenie

Wykaz aparatury pomiarowej i materiałów niezbędnych do wykonania badań przedstawiono pkt. 5 i 6 „Programu Badań”.

3. Warunki i tryb wykonywania zadania

3.1. Czas i miejsce prowadzenia badań

Łączny czas wykonania badań zgodnie z Metodyką nr 4 wynosi ok. 2 dni. Badania przeprowadzić w miejscu wyznaczonym przez Zespół badawczy.

3.2. Warunki środowiskowe

Badania przeprowadzić w temperaturze $20\pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.3. Wymagania w zakresie kwalifikacji obsługi stanowiska laboratoryjnego

Przed przystąpieniem do badań kierownik Zespołu badawczego jest zobowiązany do przeszkolenia członków Zespołu badawczego, będących bezpośrednio zaangażowanych w obsługę stanowiska laboratoryjnego, w zakresie prowadzenia badań, środków bezpieczeństwa podczas ich wykonywania oraz budowy, zasady działania i postępowania w przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska badawczego. Ponadto, członkowie Zespołu badawczego są zobowiązani do zapoznania się z niniejszą metodyką.

3.4. Wymagania BHP

Członkowie Zespołu badawczego bezpośrednio zaangażowani w wykonywanie badań podlegają kierownikowi Zespołu badawczego, który przed ich rozpoczęciem udziela instruktażu dotyczącego przestrzegania zasad bezpieczeństwa podczas prowadzenia badań.

4. Szczegółowy sposób przeprowadzenia badań

Kolejność czynności podczas prowadzenia badań:

- 1) Zestawić stanowisko laboratoryjne zgodnie z pierwszą konfiguracją przedstawioną w tab. 10 „Programu badań”;
- 2) Zestawić układ pomiarowy do pomiaru/wyznaczenia:
 - a) ciśnienia w przewodzie lufy – piezoelektryczny przetwornik ciśnienia wkręcić do gniazda znajdującego się na wysokości wykorzystywanego otworu gazowego,
 - b) ciśnienia w komorze gazowej – trzy piezoelektryczne przetworniki ciśnienia wkręcić do gniazd znajdujących się w komorze gazowej,
 - c) chwili wylotu pocisku z lufy – czujnik wylotu umieścić w obsadzie czujnika na wylocie lufy,
 - d) przemieszczenia zespołu odrzucanego – laserowy czujnik przemieszczenia umieścić w konstrukcyjnie przewidzianym do tego miejscu,
- 3) Niewykorzystywane otwory gazowe w lufie zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 4) Niewykorzystywane gniazda pod czujniki w lufie i komorze gazowej zaślepić wkrętkami bez otworów przelotowych;
- 5) Sprawdzić wizualnie poprawność zestawienia i stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
- 6) Ustawić i przetestować działanie elektropustu;
- 7) Przygotować stanowisko laboratoryjne do strzału, w tym celu:
 - a) napiąć igliczny mechanizm uderzeniowy,
 - b) wprowadzić bezpiecznik do gniazda bezpiecznika w zamku,

- c) odciągnąć suwadło w tylne położenie,
 - d) wprowadzić nabój do komory naboowej,
 - e) doprowadzić suwadło do przedniego położenia, zaczepiając pazur wyciągu o kryzę łuski,
 - f) usunąć bezpiecznik z gniazda bezpiecznika w zamku;
- 8) Uruchomić system pomiarowy w tryb akwizycji danych;
 - 9) Sprawdzić możliwość bezpiecznego oddania strzału;
 - 10) Odbezpieczyć elektropust i oddać strzał;
 - 11) Zapisać wyniki pomiarów na dysku nadając im nazwę zgodną z „Dziennikiem badań”;
 - 12) Odnotować wyniki w Dzienniku badań;
 - 13) Sprawdzić wizualnie stan techniczny stanowiska laboratoryjnego;
 - 14) Pkt. 7÷13 powtórzyć do uzyskania wymaganej liczby prób dla danej konfiguracji stanowiska laboratoryjnego;
 - 15) Wyczyścić zasadnicze elementy stanowiska laboratoryjnego (lufa, komora gazowa);
 - 16) Przekonfigurować stanowisko laboratoryjne do kolejnej konfiguracji przewidzianej w planie badań i powtórzyć pkt. 2÷15 (system pomiarowy modyfikować tylko w zakresie wymaganym przez nową konfigurację);
 - 17) Po wykonaniu wszystkich prób zdemontować i wyczyścić stanowisko laboratoryjne;
 - 18) W przypadku wystąpienia niesprawności stanowiska laboratoryjnego podczas prowadzenia strzelań, ich usunięcia dokonuje kierownik Zespołu badawczego w oparciu o dokumentację konstrukcyjną stanowiska.

5. Analiza i ocena wyników badań

Oceny wyników badań dokonuje Zespół badawczy. Za pozytywny należy uznać wynik badań, w których uzyskano wyniki prób nieodstające w sposób znaczny od wyników przewidywanych.

6. Sprawozdawczość

Dokument sprawozdawczy stanowi Dziennik badań, w którym należy ująć:

- datę przeprowadzenia badań;
- wyposażenie pomiarowe i badawcze;
- warunki środowiskowe;
- wyniki badań;
- uwagi dotyczące przebiegu badań.