

Dr hab. inż. Jan PIETRASIENSKI, prof. WAT

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.284

Mgr inż. Stanisław GRZYWIŃSKI

Mjr dr inż. Dariusz RODZIK

Dr inż. Stanisław ŻYGADŁO

Wojskowa Akademia Techniczna

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CZUJNIKÓW AKUSTYCZNYCH W CZASIE POMIARÓW ZABURZEŃ OŚRODKA WYWOŁA- NYCH PRZELOTEM POCISKU W POLU SWOBODNYM

*Streszczenie: W pracy zaprezentowano metodykę oraz wybrane wyniki badań właściwości dynamicznych pojemnościowych czujników akustycznych w czasie pomiarów w polu swobodnym zaburzeń ośrodka wywołanych prze-
lotem pocisku z prędkością naddźwiękową.*

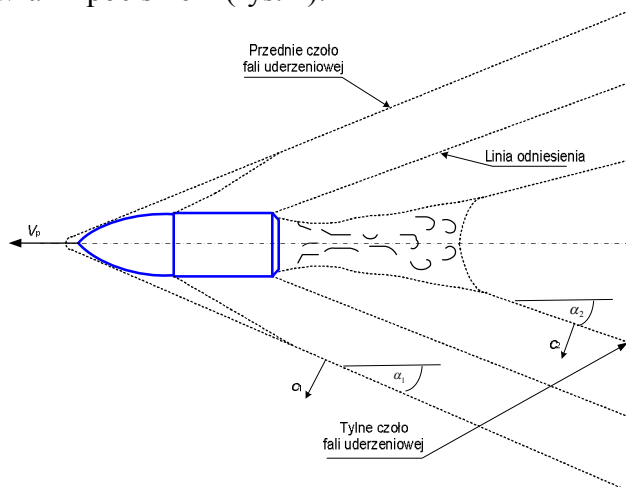
PROPERTIES TESTS OF ACOUSTIC SENSORS DURING FREE FIELD MEASUREMENT OF MEDIUM DISTURBANCES DUE TO SUPERSONIC PROJECTILE MOVEMENT

*Abstract: Some results tests of dynamic properties of analogue acoustic sensors during free field measurement of medium disturbances due to super-
sonic projectile movement are presented in the paper.*

Słowa kluczowe: fala typu N, pomiar fali N, fala akustyczna od pocisku
Keywords: N-wave, N-wave measurement, projectile shock wave

1. WPROWADZENIE

Poruszający się w polu swobodnym z prędkością naddźwiękową pocisk powoduje powstanie charakterystycznego układu fal ciśnieniowych ośrodka, które propagując, przemieszczają się wraz z pociskiem (rys. 1).



Rys. 1. Układ dwóch fal uderzeniowych
wytworzonych przez pocisk w locie
z prędkością naddźwiękową

Przekrój poprzeczny przedstawionego na rys. 1 układu dwóch fal uderzeniowych w literaturze [1] nazywany jest *falą typu N* lub *falą N*, a zależności uwzględniające wpływ wielkości geometrycznych pocisku (kaliber, długość), które opisują zmiany amplitudy Δp i czasu trwania T fali N , wyrażają równania modelu Whithama [2]. Opis matematyczny i analizę parametrów powstałego na skutek wystrzału i przelotu pocisku zaburzenia zamieszczono w literaturze [3, 4, 5].






Pomimo znacznych wartości amplitud zaburzenia *fali N* na poziomie ok. 160 dB, efekt słuchowy wynikający z naddźwiękowej prędkości pocisku jest niewielki. Jest to wynik małej wrażliwości ucha

ludzkiego w zakresie częstotliwości, w której skoncentrowana jest energia zaburzenia oraz krótkiego czasu trwania *fali N*, często rzędu ułamka *1 ms*.

Z tego samego powodu bardzo ważnym zagadnieniem jest dobór czujników pomiarowych, które pozwoliłyby wiernie odwzorować układ fal uderzeniowych oraz rozrzedzeniowych, poruszających się razem z pociskiem. Pomimo znacznego rozwoju akustycznych czujników pojemnościowych, nadal istnieje problem pomiaru sygnałów charakteryzujących się dużą dynamiką oraz znacznym poziomem ciśnienia akustycznego SPL (ang. *Sound Pressure Level*).

Dokładne zachowanie parametrów *fali N* jest niezbędne w realizacji zagadnień identyfikacji oraz określania współrzędnych przelatującego pocisku. Z tego względu podjęto prace związane z wykorzystaniem w układach lokacji akustycznej ogólnodostępnych pojemnościowych czujników akustycznych, których parametry zestawiono i opisano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry czujników badanych akustycznych¹

Oznaczenie	 ADMP405	 DUM-5246L-R	 POM-2245 L-C10-R	 MCE100	 4957
Kanał pomiarowy	1	2	3	4	5
Typ	Analogowy typu pojemnościowego (A/P)				
Producent	Analog Devices	PUI Audio Inc.		GES Electr.	Brüel&Kjær
Pasma pracy [kHz]	0,2÷15	0,02÷19	0÷20	0,05÷10	0,2÷15
Czułość [dB]	-38	-46 ± 3	-45	-61 ± 3	-38
Dynamika [dB]	88	60	55	78	88
Stosunek S/N [dB]	62	55	55	34	62
Impedancja [kΩ]	0,2	2,2	2,2	2,0	0,2
Zasilanie [V/mA]	3,6/0,25	2/0,5	2/0,5	1,5-p10/5	3,6/0,25
Wymiary [mm]	3,5x2,5x0,88	φ8x5,2	φ6x2,4	φ9,7x6,7	3,5x2,5x0,88
Temp. pracy [°C]	<-40;+85>	<-40;+85>	<-40;+85>	<0;40>	<-40;+85>
SPL [dB]	160	94	94	120	160

Celem przeprowadzonych badań była analiza przydatności wybranych czujników akustycznych w wykorzystaniu ich w projektowanej głowicy akustycznej oraz analiza możliwości wiernego odtworzenia sygnału akustycznego rejestrowanego w czasie przelotu pocisku. Ponadto badania miały na celu sprawdzenie i określenie max. SPL dla wybranych czujników akustycznych, dzięki czemu określono górną granicę zakresu ich pracy. Otrzymane wyniki wykorzystano w projekcie rozwojowym nr O ROB 0068 03 01 pt. *Opracowanie systemu oceny strzelań do celów powietrznych*, finansowanym przez NCBR w latach 2012-2015.

2. ORGANIZACJA I PRZEBIEG BADAŃ

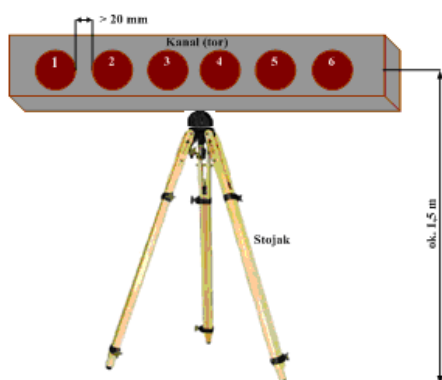
Mikrofony pomiarowe można podzielić na trzy grupy: otwartego pola (ang. *Free-field Microphone*), ciśnienia (ang. *Pressure Microphone*) i zdarzeń losowych (ang. *Random Incidence Microphone*) [6-8]. Różnice między mikrofonami poszczególnych grup sprowadzają się do szczególnych zastosowań pomiarowych, a także odmiennego wykorzystania do pomiaru sygnałów o określonym przedziale częstotliwości, nie zakłócając zaistniałego układu ciśnienia, zwłaszcza tam, gdzie wielkość mikrofonu staje się porównywalna z długością fali rejestrowanego dźwięku. Niezależnie od zastosowanego typu mikrofonu, sposób montażu mikrofonów

¹ Opracowano na podstawie not katalogowych producentów.

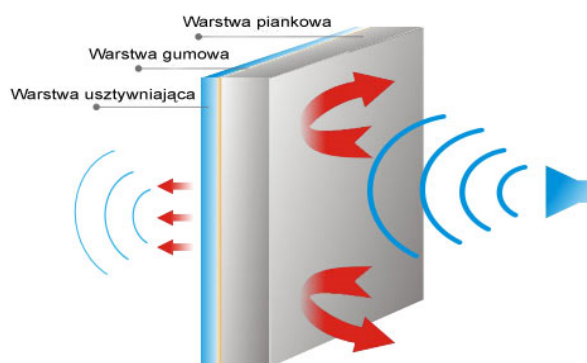
powoduje znaczne zniekształcenie rejestrowanego sygnału w dziedzinie czasu oraz częstotliwości. Co więcej, odnotowuje się znaczny wpływ zastosowanych materiałów obudowy. Stąd też badanie przeprowadzono dla różnych sposobów zamocowania czujników w obudowie statywu (rys. 2), tak aby dobrać optymalny, w jak najmniejszym stopniu niezniekształcający sygnał sposób montażu. Mikrofony rozmieszczono co 20 mm na wysokości $1,5\text{ m}$ od ziemi, w sposób schematycznie przedstawiony na rys. 3. Jako element obudowy, mocujący czujniki do statywu, wykorzystano kombinację materiałów wygłuszających (rys. 4).



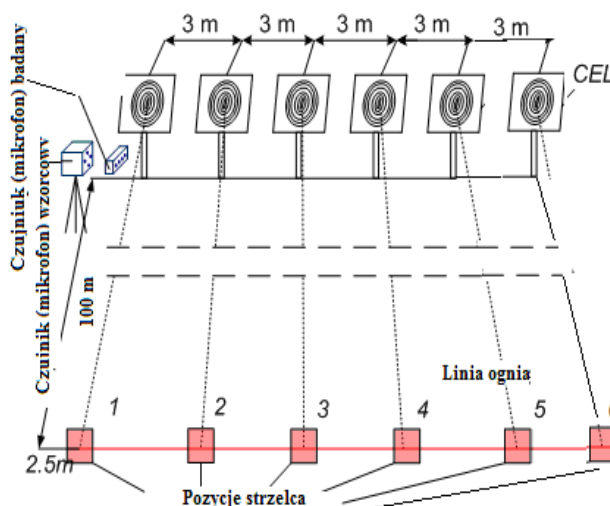
Rys. 2. Sposoby mocowania czujników w obudowie uchwytu statywu



Rys. 3. Schemat stanowiska z badanymi czujnikami



Rys. 4. Materiał wygłuszający obudowę



Rys. 5. Schemat organizacji badań na strzelnicy karabinowej

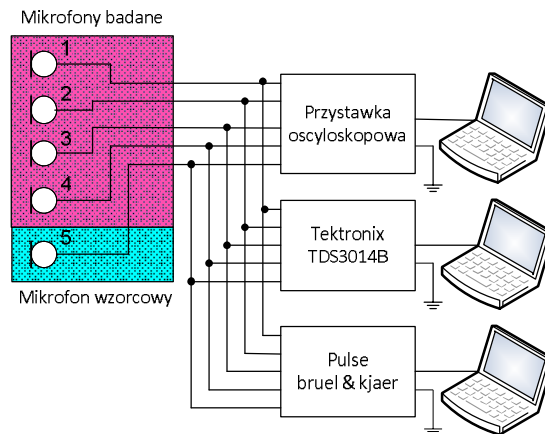
Badania przeprowadzono na strzelnicy karabinowej, na której ustawiono stanowiska ogniowe i pomiarowe, schematycznie zilustrowane na rys. 5. Podczas badań strzelano na przemian z karabinków AK-47 kalibru $7,62\text{ mm}$ oraz Beryl kalibru $5,56\text{ mm}$. Oddano łącznie 115 strzałów. Zarejestrowano ponad 100 zaburzeń w postaci fali N , generowanych przez pociski $7,62 \times 39\text{ mm}$ wz. 43 oraz $5,56 \times 45\text{ mm}$. Aby zaobserwować zmianę parametrów fali N , w trakcie strzelania zmieniano numery stanowisk ogniowych. Uzyskano w ten sposób zmiany odległości toru pocisków od czujników pomiarowych w granicach $2,5 \div 17,5\text{ m}$.

Pomiary i rejestracje realizowano na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys. 6. Przygotowanie torów pomiarowych w polu swobodnym wiąże się z rejestracją rzeczywistych zaburzeń towarzyszących strzałom. Badania tego typu są skomplikowanym przedsięwzięciem nie tylko ze względów bezpieczeństwa, ale i odpowiedniego przygotowania urządzeń oraz planu badań. W celu wyeliminowania błędów pomiarowych sygnały z czujników były rejestrowane równoległe przez oscyloskop Tektronix TDS3014B, przystawkę oscyloskopową PICO 3406D oraz rejestrator 3050-A-060 firmy Brüel & Kjaer. W celu zapewnienia wysokiej jakości pracy zestawiono układ pomiarowy wyposażony w moduł zasilania bateryjnego wraz z układami stabilizacji napięcia 3,3 V i 5 V.

Za pomocą oscyloskopu przeprowadzono rejestrację z częstotliwością próbkowania 500 kHz, która została dobrana na podstawie przesłanek określających błąd procesu lokacji obiektów oraz odwzorowania sygnałów. Pozwoliło to na dokładną rejestrację niezbędną do dalszej analizy zarejestrowanych sygnałów w procesie *post processingu*. Podczas badań zarejestrowano zjawiska echa i pogłosu, które później wykorzystano w opracowaniu algorytmów lokalizacji.

Na podstawie uzyskanych wyników badań: porównywano zarejestrowane przebiegi sygnałów zaburzenia ośrodka w postaci fali N z przebiegami teoretycznymi [3, 4, 5];

- porównano wartości liczbowe parametrów fali N obliczone z zależności teoretycznych i pomierzonych w czasie badań;
- oceniano poziom sygnału akustycznego SPL na wejściu oraz odpowiadający poziom sygnału fonicznego na wyjściu badanych czujników w zależności od wielkości kalibru pocisku i odległości jego przelotu względem stanowiska pomiarowego;
- zweryfikowano odległość przelotu pocisku od czujników pomiarowych wyznaczoną na podstawie parametrów fali N z odległością pomierzoną;
- porównano i przeanalizowano zarejestrowane sygnały z badanych czujników akustycznych oraz zweryfikowano ich przydatność w warunkach rejestracji strzelań amunicją kalibru 7,62 mm (karabinek AK-47) i kalibru 5,56 mm (karabinek Beryl).

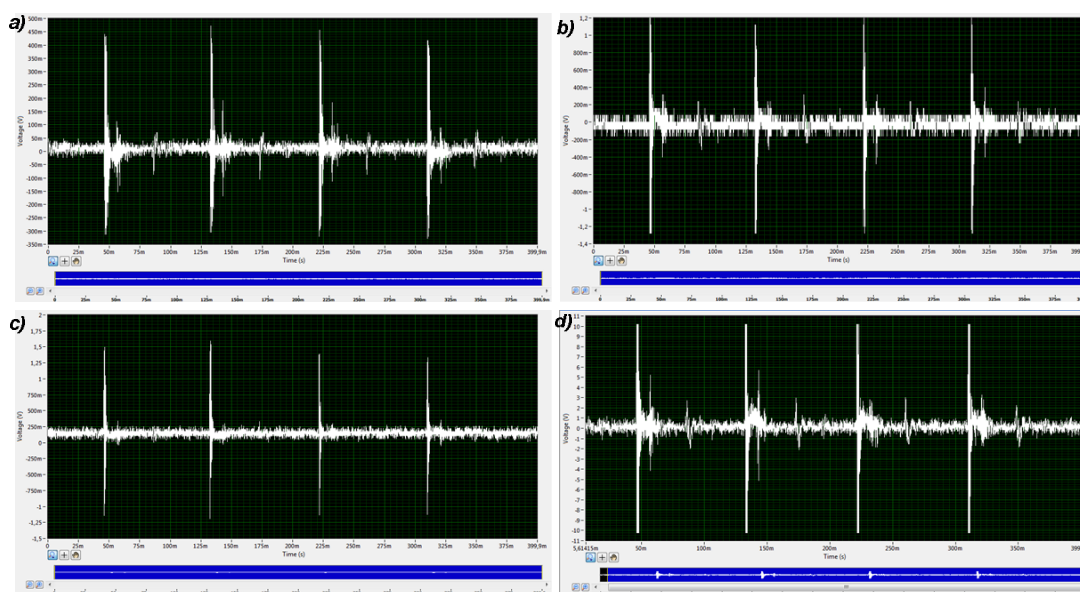


Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego

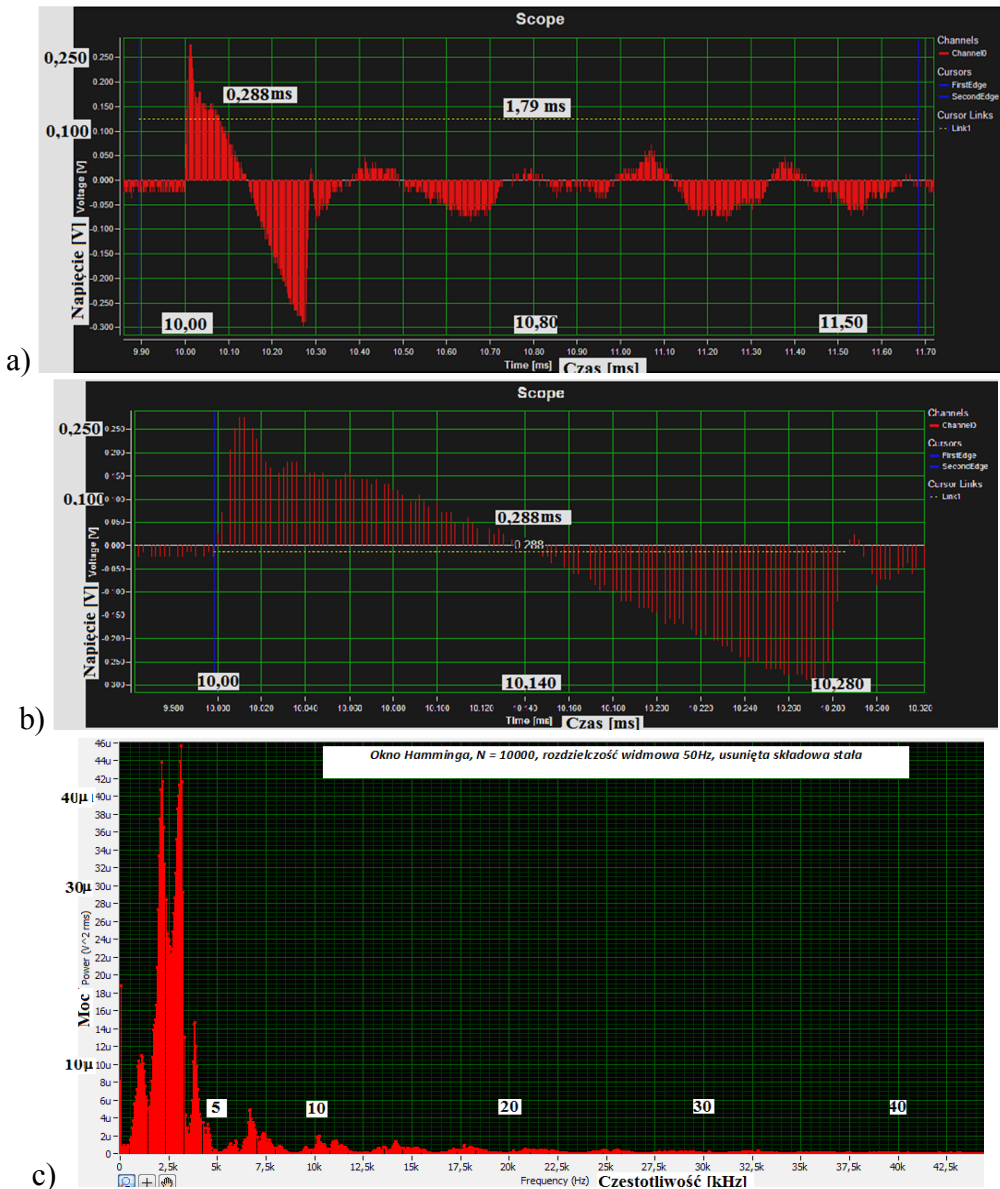
3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

W pierwszej części analizy zarejestrowanych wyników skupiono się na jakości odwzorowania fali N przez poszczególne czujniki i tory pomiarowe, by w drugiej kolejności móc porównać obliczone wartości teoretyczne czasu trwania fali N z pomierzonymi oraz ocenić przydatności badanych czujników w procesie detekcji zaburzeń ośrodka na skutek przelotu pocisków z prędkością naddźwiękową i lokacji samych pocisków.

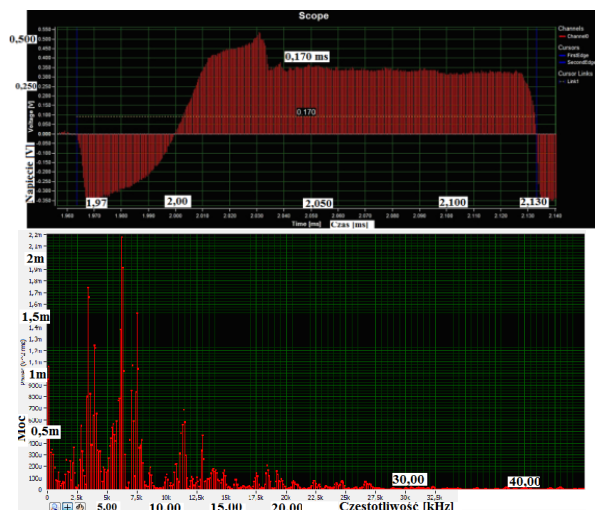
Zarejestrowane sygnały foniczne fali N pochodzące od wystrzelonej serii z karabinka AK-47 przedstawiono na rys. 7. Na rys. 8 przedstawiono przebiegi czasowe i widmo częstotliwościowe sygnału z mikrofonu 4957 zarejestrowane przy strzelaniu karabinkiem AK-47 ze stanowiska nr 6. Konfiguracja takiego usytuowania strzelca odpowiada odległości $17,5\text{ m}$ pomiędzy czujnikiem a przelatującym pociskiem. Na podstawie analizy parametrów zarejestrowanego sygnału stwierdzono, że zaburzenie ciśnieniowe ośrodka trwało ok. $1,79\text{ ms}$, a czas trwania fali N wynosił $0,270\text{ ms}$. Zarejestrowany przebieg porównano z teoretycznym. Parametry fali N zostały odwzorowane zgodnie z wyliczeniami teoretycznymi, przez co uznano ten mikrofon za wzorcowy, względem którego możliwe jest porównanie z pozostałymi czujnikami. Na rys. 9 przedstawiono przebiegi czasowe oraz częstotliwościowe sygnałów z czterech badanych czujników przy strzelaniu karabinkiem AK-47 również ze stanowiska nr 6. Na ich podstawie można stwierdzić, że w każdym z mikrofonów nastąpiło przesterowanie. Z tego względu czujniki pracowały w zakresie silnie nieliniowym, co ma odwzorowanie w widmach częstotliwościowych sygnałów.



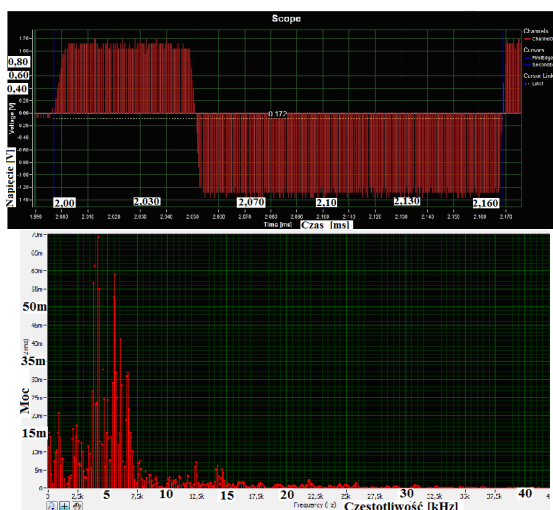
Rys. 7. Sygnał fali N pochodzący od wystrzelonej serii z karabinka AK-47 zarejestrowany w kanale pomiarowym nr a) 1, b) 2, c) 3, d) 4



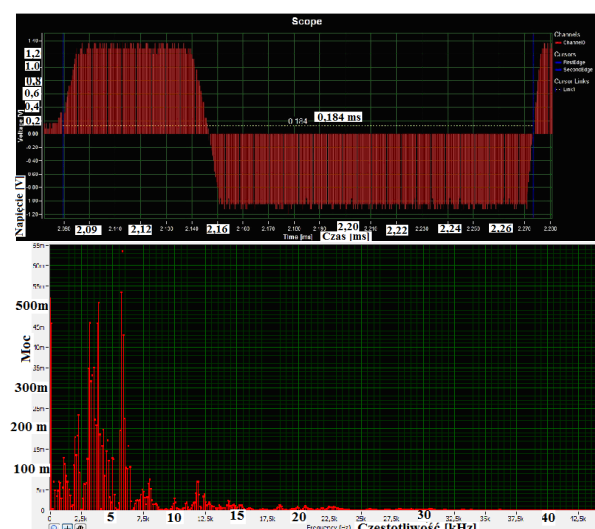
Rys. 8. Sygnał fali N z mikrofonu wzorcowego 4957 przy strzale z AK-47 ze stanowiska 6:
 a), b) przebieg czasowy sygnału zaburzenia; c) widmo częstotliwościowe



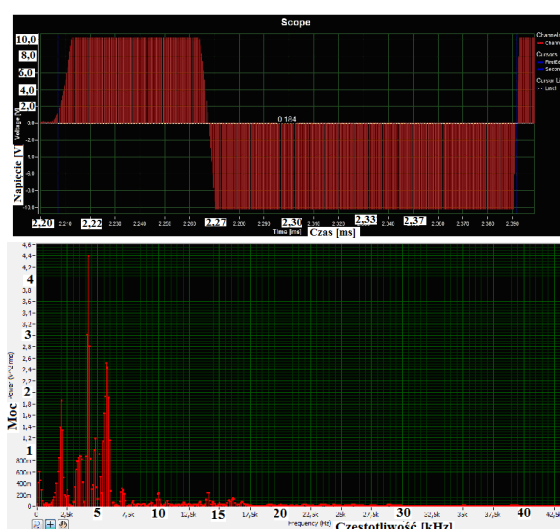
a) ADMP405



b) DUM5246L-R

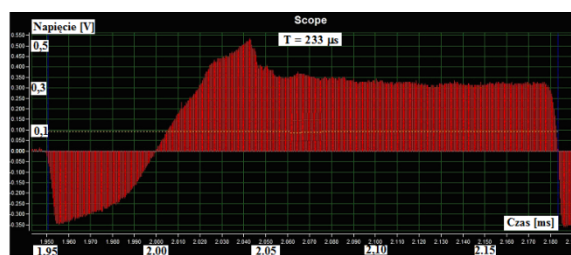


c) POM2245L-C10-R

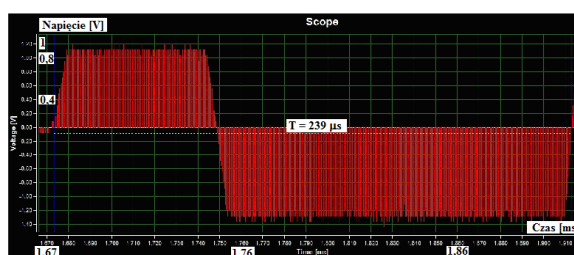


d) MCE100

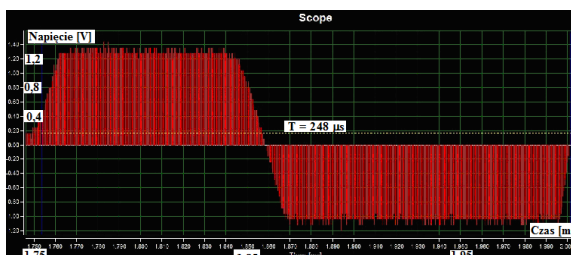
Rys. 9. Sygnały fali *N* i ich widmo przy strzale z karabinka AK-47 ze stanowiska nr 6



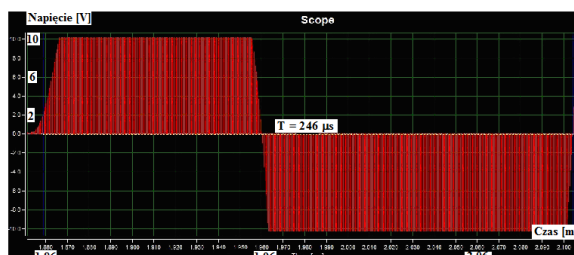
ADMP405



DUM-5246L-R

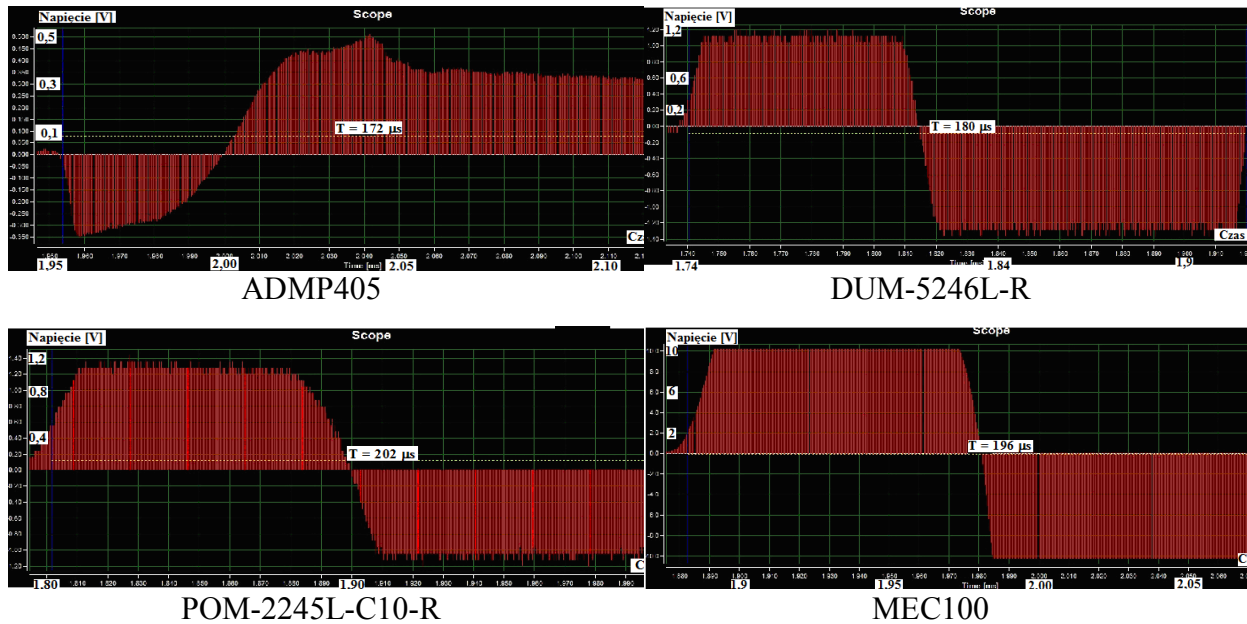


APOM-2245L-C10-R



MEC100

Rys. 10. Sygnały fali *N* przy strzale z karabinka AK-47 ze stanowiska nr 3

Rys. 11. Sygnały fali N przy strzale z karabinka Beryl ze stanowiska nr 3

W celu oceny przydatności badanych czujników do wykorzystania w głowicy akustycznej porównano czasy trwania fali N zarejestrowanych sygnałów z wynikami obliczeń teoretycznych wg zależności zamieszczonych w opracowaniach [3, 4]. Wybrane do porównań przebiegi zarejestrowanych sygnałów fali N pokazano na rys. 10 i 11, a wynik obliczeń i uśrednione wartości pomiarów przedstawiono w tabeli 2. Należy zauważyć, że wyniki obliczeń są obarczone błędem rozrzutu strzelającego względem środka tarczy (do obliczeń teoretycznych przyjęto odległości do środka tarczy, gdyż nie mierzono odległości do każdej z przestrzelin z osobna), natomiast wyniki pomiarów były obarczone błędem uśredniania.

Tabela 2. Wyniki obliczeń i pomiarów czasu trwania T zaburzenia fali N

Nr stanowiska ogniowego	Odległość [m]	T [μs]					
		obliczone	Wzorcowy 4135	ADMP 405	DUM 5246L-R	POM 2245L-C10-R	MCE 100
Karabinek AK-47, amunicja kalibru 7,62 mm							
1	2,5	166	166±3	171±3	175±3	188±3	190±3
2	5,5	202	202±2	198±3	212±3	225±3	220±3
3	8,5	225	225±1	229±3	235±3	245±3	240±3
4	11,5	243	243±1	246±3	255±3	265±3	265±3
5	14,5	257	257±1	262±3	271±3	278±3	284±3
Karabinek Beryl, amunicja kalibru 5,6 mm							
1	2,5	135	135±3	125±3	140±3	176±3	160±3
2	5,5	165	165±2	156±3	163±3	184±3	178±3
3	8,5	184	184±1	173±3	184±3	200±3	202±3
4	11,5	198	–	–	–	–	–
5	14,5	210	210±1	208±3	216±3	245±3	245±3

4. PODSUMOWANIE

Analiza wyników badań wykonanych na strzelnicy WAT dostarczyła istotnych informacji o problemach, na jakie projektując urządzenie lokacyjne, powinno się zwrócić szczególną uwagę, używając badanych mikrofonów pomiarowych. Jednym z najważniejszych problemów jest zaprojektowanie urządzenia, które posiadałoby zdolność pomiarową nie tylko dla określonego zasięgu detekcji, ale również dla różnorodnego wachlarza używanej amunicji. Ponadto ze względu na rozpiętość czułości wkładek mikrofonowych sięgających od 0,5-6 mV/Pa mamy do czynienia z niedopasowaniem czułości mikrofonu do poziomu wejściowych sygnałów akustycznych zaburzeń w postaci fal uderzeniowych o znacznym SPL. W przypadku rejestracji fali N , gdzie mamy do czynienia ze znaczną energią sygnału, mikrofony w naturalny sposób ulegną przesterowaniu. Związane jest to z maksymalnym możliwym wychyleniem membrany mikrofonu.

Przeprowadzony eksperyment potwierdził postulaty Whithama w części dotyczącej kształtu i czasu trwania zaburzenia ośrodka w postaci fali N wywołanej naddźwiękowym ruchem pocisku w polu swobodnym. Zbieżność pomierzonych czasów trwania fali N z obliczonymi przy pomocy postulatów Whithama [3, 4] jest duża, pomimo przedstawionych w tabeli 2 wyników obarczonych błędem uśredniania i mało precyzyjnego określania rzeczywistej odległości pocisku od czujników pomiarowych.

Badane czujniki odwzorowywały sygnały z mniejszą dokładnością niż wzorcowy, przy czym najlepszy jest mikrofon ADMP405, a najgorszy MCE100. Uzyskane wyniki pomiarów nie dyskwalifikują żadnego z badanych mikrofonów w procesie doboru czujników dla głowicy akustycznej w zagadnieniach detekcji fali N .

**Praca finansowana przez NCBR ze środków na naukę,
jako projekt badawczo-rozwojowy realizowany w latach 2012-2015.**

LITERATURA

- [1] Sadler B.M., Pham T., Sadler L.C.: *Optimal and wavelet-based shock wave detection and estimation*, "Journal Acoustic Society of America", vol. 104, No. 2, Pt.1, August 1998, pp. 955-963.
- [2] Whitham G.B.: *The flow pattern of a supersonic projectile*, Commun. Pure and Appl. Math., vol. 5, pp. 301-348, November, 1952.
- [3] Rodzik D.: *Investigation of N-Wave Propagation Parameters of Free Field Projectiles Moving*, Proceedings of 58th Open Seminar on Acoustics, T.2., Jurata, 13-16 September 2011, pp. 217-228.
- [4] Pietrasieński J., Żygadło S., Rodzik D., Warchulski J., Warchulski M.: *Badanie parametrów przestrzenno-czasowych zaburzeń ośrodka wywołanych lotem pocisku*, „Biuletyn WAT”, Vol. LVI, nr specjalny (1); s. 413-422.
- [5] Pietrasieński J., Rodzik D., Warchulski J., Warchulski M.: *Analiza częstotliwościowa zaburzeń ośrodka wywołanych ruchem pocisku*, „Biuletyn WAT”, vol. LVI, nr specjalny (1); s. 433-443.

- [6] *Sound Fields and Measurement Microphones*, Technical Note 1401.
- [7] IEC 61094-7: 2006: *Measurement microphones – Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones*.
- [8] *Microphone handbook*, PCB Piezotronics.