

Marcin MICHALCZYK*

PROBLEMATYKA POMIARÓW WIELKOŚCI FIZYCZNYCH TOWARZYSZĄCYCH EKSPLOZJI ORAZ WYBRANE ZAGADNIENIA METROLOGICZNE Z EKSPLOATACJI ANTROPOMORFICZNEGO URZĄDZENIA POMIAROWEGO

W artykule przedstawiono problematykę pomiarów wielkości fizycznych towarzyszących eksplozji. Wprowadzeniem do artykułu jest opis aktualnie obowiązujących regulacji w tym zakresie. Wyszczególniono urządzenia i systemy niezbędne do prowadzenia badań oraz wskazano kryteria oceny. W dalszej części przedstawiono zagadnienia dotyczące praktyki metrologicznej. Opisano metody synchronizacji startu akwizycji i eksplozji, kryteria doboru i metody montażu przetworników pomiarowych, problematykę przesyłania sygnałów na bezpieczne odległości oraz zagadnienia dotyczące analizy otrzymanych wyników. Przedstawiono praktyczne rozwiązania tych problemów w oparciu o badania prowadzone w Zakładzie Ekspertyz Materiałowych Uzbrojenia i Sprzętu WITPiS. Bazując na doświadczeniu zdobytym w trakcie badań z wykorzystaniem antropomorficznego urządzenia pomiarowego Hybrid III, opisano najważniejsze zagadnienia eksploatacyjne. Wskazano te obszary, które w warunkach niestacjonarnych są najbardziej problematyczne oraz rozwiązania praktyczne tych problemów.

Słowa kluczowe: eksplozja, pomiary wielkości fizycznych towarzyszących eksplozji, antropomorficzne urządzenie pomiarowe Hybrid III

WSTĘP

Biorąc pod uwagę światową sytuację geopolityczną oraz związany z nią rozwój technik militarnych, niezwykle aktualna staje się problematyka ochrony załóg pojazdów, a w tym pomiarów ciśnień, przyśpieszeń i innych parametrów dynamicznych oddziałujących na ludzi. Z uwagi na swoistą „niesymetryczność” stron konfliktu, a wraz z tym rodzaj i charakter zagrożeń, stoimy przed potrzebą zmiany pancerzy i osłon. Wydaje się, że zmiana ilościowa, to jest, zwiększanie grubości tradycyjnego pancerza

* mgr inż. Marcin MICHALCZYK – Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

osiągnęła swoje apogeum. Poszukiwanie nowych materiałów i technologii ochronnych niesie za sobą potrzebę doskonalenia metod określania ich właściwości.

Do stwierdzenia skuteczności ochrony ludzi czy to w pojazdach, czy innych obiektach niezbędne są próby, w których rejestrowane są wyżej wspomniane wielkości fizyczne. Problematyka pomiarów towarzyszących eksplozji jest jednym z najważniejszych zagadnień w aspekcie nowoczesnych pojazdów opancerzonych.

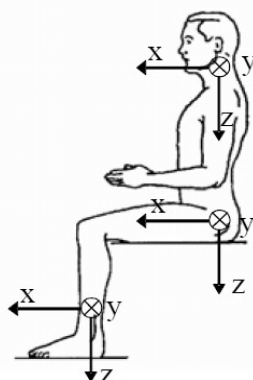
Głównym dokumentem normatywnym oceny skuteczności ochrony załóg jest umowa standaryzacyjna NATO STANAG 4569 [1]. Procedura AEP-55, Volume 2 [2] definiuje w sposób jednoznaczny instrumentarium metrologiczne. Niezbędne są następujące urządzenia:

- przynajmniej jedno antropomorficzne urządzenie pomiarowe ATD (*anthropomorphic test device*) typu Hybrid III 50 centyli;
- przynajmniej dwa przetworniki pomiaru ciśnienia;
- sensory (przemieszczenia, siły, przyspieszenia) umieszczone w węzłach konstrukcyjnych obiektu;
- kamery wewnątrz pojazdu, w tym jedna szybka.

Użycie ATD jest konieczne w celu zmierzenia biomechanicznych skutków eksplozji. Do uzyskania pełnego obrazu wymagane jest zmierzenie wartości:

- sił i momentów w dolnej części goleni - F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ;
- sił i momentów w górnej części goleni- F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ;
- przyspieszeń w piszczelach - A_x , A_y , A_z ;
- siły w udach - F_x ;
- przyspieszenia w miednicy, klatce piersiowej, głowie - A_x , A_y , A_z ;
- sił i momentów w lędźwiowym odcinku kręgosłupa - F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ;
- sił i momentów w szyjnym odcinku kręgosłupa - F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z .

W zakresie układu współrzędnych przyjęto konwencję przedstawioną na rysunku 1 [3,4].



Rys. 1. Hybrid III ATD – układu odniesienia

Źródło: Opracowano na podstawie [3, 4]

Ocenę zranień, poza oczywistą interpretacją uszkodzeń widocznych na ATD, przeprowadza się minimum w oparciu o kryteria:

- ocena siły miazdzącej w dolnej części goleni Fz;
- wskaźnik oddziaływania dynamicznego przeciążenia na kręgosłup DRIZ (Dynamic Response Index for axial direction);
- ocena siły miazdzącej w górnej części kręgosłupa szyjnego Fz;
- ocena momentów w górnej części kręgosłupa szyjnego;
- wskaźnik prędkości ugięcia klatki piersiowej CWVP (Chest Wall Velocity Predictor).

Na potrzeby określenia wskaźnika DRIZ i CWVP opracowane są modele matematyczne [2].

1. PRAKTYCZNE ZAGADNIENIA W POMIARACH WIELKOŚCI FIZYCZNYCH TOWARZYSZĄCYCH EKSPLOZJI

1.1. Problematyka synchronizacji startu rejestracji i eksplozji

Problematyka synchronizacji startu rejestracji i detonacji sprowadza się do podjęcia rejestracji przez wszystkie systemy, w momencie ściśle skorelowanym z eksplozją. Aby to zapewnić, stosuje się urządzenia które na podstawie światła (błysku), dźwięku lub innego parametru, inicjują akwizycję.

Najprostszym rozwiązaniem jest układ włączony w linię strzałową i generujący sygnał startu rejestracji w momencie powstania impulsu zapalającego. Rozwiązanie takie mimo, wydawałoby się, swojej prostoty nie jest praktykowane. Po pierwsze wymaga ingerencji w linię strzałową (mechanizm inicjujący eksplozję), co jest niedopuszczalne. Drugą zasadniczą wadą jest fakt zmienności okresu od inicjacji do eksplozji. Pewnym rozwiązaniem, które eliminuje częściowo te niedogodności, jest sprzężenie magnetyczne obwodu zapalnika i na podstawie sygnału prądowego wypracowanie sygnału startu rejestracji. Kolejną metodą, praktykowaną w określonych warunkach, jest stosowanie czujników mechanicznych zwarciovo/rozwarciowych i przerzutnika Schmitta (*Schmitt trigger*). W sprzedaży dostępne są czujniki wykonane w postaci kartoników z naniesionymi przewodzącymi ścieżkami. Najdogodniejsze w warunkach polowych, a w takich odbywają się badania, są wyzwalacze optyczne i akustyczne. Na ogół są to zaawansowane rozwiązania komercyjne. Dobrą praktyką, jest stosowanie funkcji *pretrigger* w urządzeniach rejestrujących. Jednak na ogół jest to utrudnione ze względu na ograniczoną pamięć rejestratorów (szybkich kamer). Okres rejestracji dla obiektów o masie do 10 ton powinien wynosić około 2 sekundy.

Niezwykle istotne, z punktu widzenia interpretacji wyników, jest powiązanie w czasie wszystkich danych. W przypadku braku możliwości zagwarantowania synchronicznego startu wszystkich urządzeń rejestrujących pewnym rozwiązaniem jest wygenerowanie znacznika (markera), który posłuży do późniejszej synchronizacji pomiarów. Można również korzystać z gotowych sekwenserów, jednak ze względu na dodatkową komplikację toru pomiarowego, jest to niepraktyczne.

1.2. Dobór przetworników pomiarowych i ich zakresu

Przez wzgląd na to, że zakres wartości sygnałów wejściowych jest nieprzewidywalny, w nowym obiekcie implikuje to dodatkowe trudności. Badając obiekt, niepoddany wcześniej próbom, zakładać należy duże wartości sygnałów. Ma to na celu zminimalizowanie ryzyka uszkodzenia kosztownych przetworników pomiarowych. Decyzja o umieszczeniu ATD w takim obiekcie w głównej mierze podejmowana jest w oparciu o wcześniejsze doświadczenia. Z kolei w momencie wystąpienia sygnału pomiarowego o małej wartości (niewielki stosunek sygnału użytecznego do zakresu pomiarowego przetwornika) pożądane jest zarejestrowanie go z rozdzielczością gwarantującą dalszą obróbkę. Narzuca to konieczność stosowania co najmniej 12 bitowej rozdzielczości na etapie digitalizacji.

Ze względu na charakter rejestrowanego zjawiska, jego dynamizm, stosuje się zasadniczo dwa rodzaje przetworników pomiarowych sił, momentów i przyspieszeń. Są to przetworniki piezoelektryczne PE i przetworniki piezorezystancyjne PR.

Przetwornik piezoelektryczny jako podstawę swojego działania wykorzystuje efekt piezoelektryczności. Materiały do budowy tego typu przetworników to kwarc lub polikrystaliczne materiały ceramiczne, które poddane oddziaływaniu naprężeń, generują różnoimienne ładunki na swojej powierzchni. Liczba skumulowanych jonów jest proporcjonalna do przyłożonej siły. Aby uzyskać przetwornik przyspieszenia (akcelerometr) na jednej z powierzchni umieszczona jest masa. W związku z tym, że przesyłanie sygnału ładunkowego jest stosunkowo trudnym zagadnieniem w warunkach poligonowych, firma PCB Piezotronics stworzyła przetworniki serii ICP (Integrated Circuit - Piezoelectric). Wewnątrz obudowy przetwornika zawarty jest układ elektroniczny, który konwertuje wysoko impedancyjny sygnał ładunkowy na nisko impedancyjny sygnał napięciowy, dogodny do bezpośredniego przesyłania i rejestracji. Do zalet przetworników PE ICP należy zaliczyć:

- podłączenie dwużyłowym kablem koncentrycznym;
- niską złożoność toru pomiarowego;
- łatwość kondycjonowania;
- wysoką czułość;
- bardzo dobry stosunek sygnału do szumu;
- szeroki zakres pomiarowy.

Kondycjonowanie przetworników ICP wymaga zasilania ze źródła prądowego o wartości 2-20mA przy napięciu do 18-30V. Jednak wady takie jak brak odpowiedzi na wymuszenia quasistatyczne, nasycanie przy dużych wymuszeniach oraz niskie częstotliwości rezonansowe powodują wypieranie ich przez przetworniki piezorezystancyjne. Przetworniki PR zbudowane są w oparciu o monolityczne rezystory krzemowe, których rezystancja jest proporcjonalna do działających na nie naprężeń. Są to na ogół przetworniki w układzie czteroelementowego mostka. Podstawowe zalety tego typu przetworników to:

- wysoka czułość, przy doskonałym stosunku sygnał/szum;
- pomiar wielkości wolnozmiennych i statycznych (PE częstotliwość dolna do ok. 5 Hz);

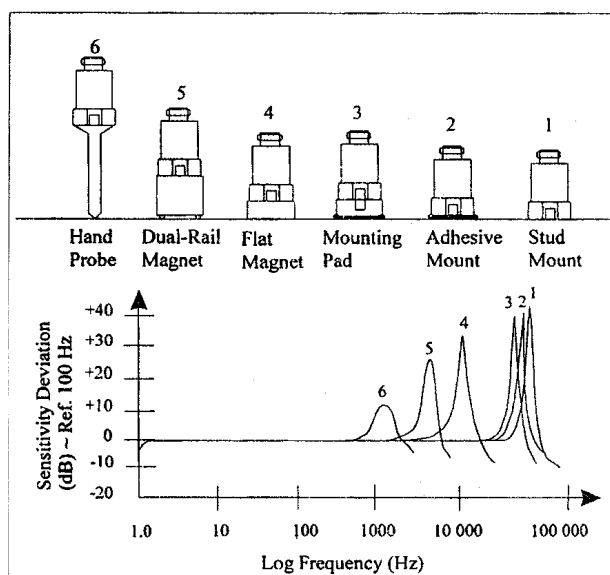
- wysoka częstotliwość rezonansowa;
- liniowość charakterystyki przetwarzania, brak błędu od przeciążenia (PE np. 1%/500g);
- mała podatność na zmianę temperatury;
- różnicowe wyprowadzenie sygnału użytecznego.

Przetworniki PR wymagają stosunkowo rozbudowanych urządzeń kondycjonujących. Sygnał na poziomie mV jest stosunkowo trudno przesyłać na duże odległości. Typowy kondycjoner zawiera wysokostabilne źródło napięciowe zasilające mostek oraz niskoszumny wzmacniacz pomiarowy o regulowanym wzmacnieniu. W praktyce bardzo przydatną funkcją jest funkcja autozerowania - umożliwia ona automatyczne ustawienie DC offset. Istotne jest właściwe dobranie poziomu wzmacnienia we wzmacniaczach pomiarowych. Dobiera się je na podstawie wiedzy praktycznej i doświadczenia.

1.3. Właściwe umiejscowienie i montaż przetworników

Pisząc o pomiarach wielkości fizycznych towarzyszących eksplozji, należy mieć na uwadze, że miejsce i sposób mocowania przetwornika pomiarowego ma istotne znaczenie z punktu widzenia wierności odwzorowania zjawiska. Wybór usytuowania przetworników ciśnienia w kabinie badanego pojazdu (lub innym obiekcie) odbywa się na zasadzie najgorszego przypadku. Często stosuje się kilka przetworników w różnych miejscach.

Montując przetworniki mechaniczne, należy mieć na uwadze wpływ montażu na charakterystykę częstotliwościową [5].



Rys. 2. Wpływ rodzaju montażu przetwornika na częstotliwość rezonansową

Źródło: Opracowano na podstawie [5]

1.4. Transmisja sygnałów na bezpieczne odległości oraz zapewnienie właściwej odporności toru pomiarowego na zakłócenia

Źródłem zakłóceń (zakładając separację obwodów zasilania) w torze pomiarowym są:

- zakłócenia indukowane w kablach na skutek obecności pól elektromagnetycznych, w tym zakłócenia od sieci energetycznej;
- wysoki impuls elektromagnetyczny pochodzący z linii strzałowej;
- ewentualnie impuls elektromagnetyczny powiązany z eksplozją, lub w wyniku jej oddziaływania na badany obiekt.

Podłączenie przetworników PE ICP za pomocą długich kabli (rzędu kilkudziesięciu i więcej metrów) stwarza dodatkowe problemy. Poza sprawami związanymi z indukowaniem się zakłóceń, znaczącym problemem jest wpływ pojemności kabla na górną częstotliwość sygnału. Jest ona proporcjonalna do wartości prądu polaryzującego przetwornik i odwrotnie proporcjonalna do pojemności zastępczej linii [6, 7]. W Wojskowym Instytucie Techniki Pancерnej i Samochodowej opracowano kondycjoner, który przy swojej kompaktowej budowie, zapewnia uzyskanie wysokich częstotliwości granicznych transmitowanego sygnału. Daje to możliwość transmisji na odległość kilkuset metrów. W przypadku toru pomiarowego z wykorzystaniem przetworników PR sprawa jest trudniejsza. Na transmitowany sygnał o amplitudzie kilku mV nakładają się zakłócenia. Dopuszczalny stosunek sygnału użytecznego do szumu wymusza niewielką odległość przetwornika od wzmacniacza pomiarowego. Rozwiązaniem stosowanym w najnowszej czwartej lub piątej generacji, jest akwizycja danych w badanym obiekcie.

1.5. Analiza i interpretacja wyników

Obróbka danych po zarejestrowaniu sprowadza się do zagadnienia zerowania i filtrowania sygnału za pomocą procedur numerycznych [8]. Zerowanie ma na celu znalezienie poziomu odniesienia dla wartości zmierzonych. Na skutek różnych czynników poziom zera może się przesunąć, w związku z tym jako wartość zerową przyjmuje się wartość średnią sygnału bezpośrednio przed badaniem. Filtrowanie ma na celu pozostawienie pasma częstotliwości, adekwatnych do obiektu. Związane jest to z masą i częstotliwością naturalną części ciała człowieka. W ujęciu ogólnym CFC (Channel Frequency Class), wyrażone w Hz, dobrane są w następujący sposób:

- | | |
|---|------|
| – pasy bezpieczeństwa | 60 |
| – siły i momenty w kończynach | 600 |
| – siły i momenty w kręgosłupie lędźwiowym | 600 |
| – momenty w kręgosłupie szyjnym | 600 |
| – siły w kręgosłupie szyjnym | 1000 |
| – przyspieszenia w głowie i goleniach | 1000 |

Należy sprawdzić, czy zakresy pomiarowe przetworników nie uległy przekroczeniu, gdyż skutkować to może znacznymi błędami. Szczegółowa analiza przebiegów pozwala stwierdzić, czy przetwornik (wzmacniacz) nie nasycił się. Dla PE czujników ciśnienia należy uwzględnić poprawkę wynikającą z przyspieszenia.

Za pomocą pakietów narzędziowych typu MatLab lub innych należy dokonać zawężenia pasma stosownie do klasy oraz obliczyć wskaźniki przywołane w wymaganiach [2, 3, 4].

2. WYBRANE ZAGADNIENIA EKSPLOATACYJNE URZĄDZENIA ANTROPO-MORFICZNEGO HYBRID III

Jak wcześniej wspomniano urządzenie antropomorficzne wyposażone jest w odpowiedni tor pomiarowy wraz z zestawem przetworników. Rozwój elektroniki umożliwił jego miniaturyzację i przebiegał następująco:

- I generacja - systemy Off-Board;
- II generacja - systemy PCM;
- III generacja - systemy On-Board;
- IV generacja - systemy In-Dummy;
- V generacja - zdecentralizowane systemy In-Dummy.

Wojskowy Instytut Techniki Panczernej dysponując urządzeniem Hybrid III wraz z systemem rejestracji off-board, wykonywał badania poligonowe. Zebrane doświadczenia umożliwiły znacząco przyczynić się do rozwoju tej dziedziny. Bazując na nich, nakreślić można kilka problematycznych obszarów w tytułowym zagadnieniu.

Pierwszy obszar – zapewnienie bezpiecznej odległości obsługi, a tym samym urządzeń rejestrujących, od miejsca eksplozji. Implikuje to następujące problemy:

- odpowiednie kondycjonowanie i ekranowanie sygnałów (opisano wcześniej);
- konieczność wyprowadzenia kilkudziesięciu kabli z kabiny badanego pojazdu (obiektu), tak aby nie uległy przecięciu lub uszkodzeniu w czasie eksplozji;
- kondycjonowanie sygnału w obszarze oddziaływania eksplozji, konieczność stosowania aparatury odpowiednio chronionej.

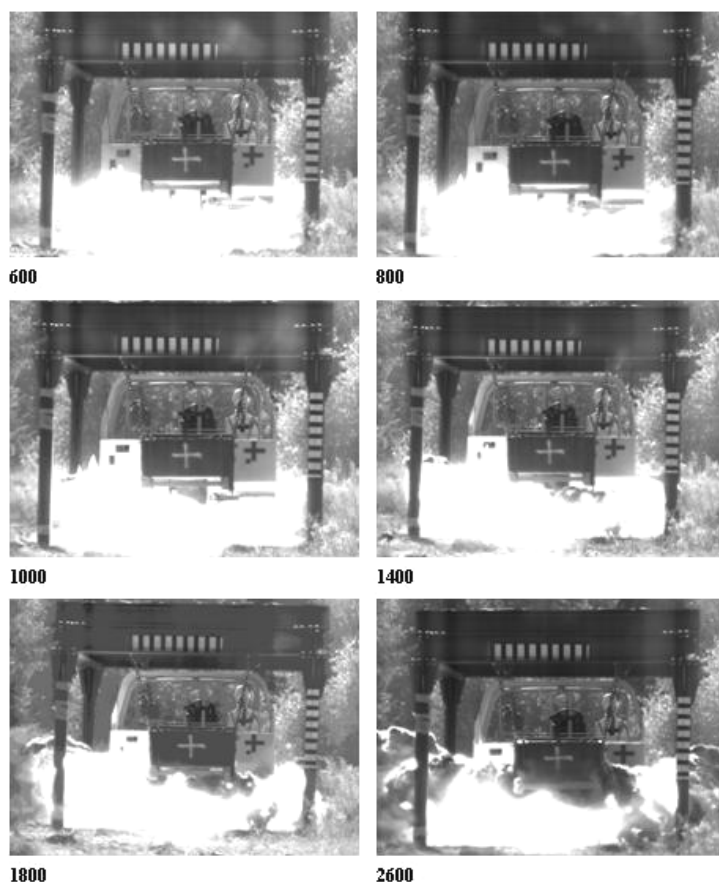
Drugi obszar – uodpornienie toru pomiarowego na warunki atmosferyczne:

- stosowanie aparatury odpornej na warunki środowiskowe (deszcz, niskie temperatury) wykonanie minimum IP 55;
- odpowiednie złącza, są one najsłabszym ogniwem systemu.

Trzeci obszar – zaplecze:

- właściwe zasilanie na potrzeby toru pomiarowego, problematyka zakłóceń od przetwornic napięcia;
- procedury przygotowania, diagnozowania toru pomiarowego w warunkach polowych;
- zapewnienie odpowiednio przeszkolonego personelu.

Zważywszy na spektrum zagadnień, pomiary tego typu są trudne w realizacji. Oddziaływanie eksplozji nie jest całkowicie przewidywalne. Należy pamiętać o potencjalnym zagrożeniu zniszczenia aparatury, w tym ATD. Ryzyko z tym związane powoduje duże koszty takich badań.



Rys. 3. Eksplozja, widoczne manekiny pomiarowe (czas w ms)

Źródło: Opracowanie własne

Cześć problemów wskazanych wyżej można wyeliminować poprzez zastosowanie systemów In-Dummy. System ten zawiera cały tor pomiarowy, począwszy od przetworników, poprzez konwersje A/D, filtrowanie i rejestratory w korpusie urządzenia ATD. Najnowsze systemy tego typu są na tyle zdecentralizowane, że przetwornik pomiarowy zintegrowany jest z przyporządkowanym mu autonomicznym rejestratorem. Daje to możliwość odczytania zarejestrowanych sygnałów nawet przy naruszeniu integralności ATD.

Spektrum zagadnień dotyczących metrologii wielkości fizycznych towarzyszących eksplozji jest bardzo szerokie. Zagadnienia poruszone w artykule nie wyczerpują tej tematyki. Nad szeregiem zagadnień prowadzone są badania w celu pełniejszego ich poznania. Mając na uwadze aspekt i celowość badań, należy mieć nadzieję, że rozwój tej dziedziny będzie właściwie spożytkowany

LITERATURA

- [1] NATO Standardisation Agreement, *Protection Levels For Occupants Of Logistic And Light Armoured Vehicle*, STANAG 4569 Edition 1.

- [2] Allied Engineering Publication, *Procedures For Evaluating The Protection Levels Of Logistic And Light Armoured Vehicle Occupants For Grenade And Blast Mine Threats Level*, AEP-55, Volume 2 (Edition 1).
- [3] SAE International, Surface Vehicle Recommended Practice, *Instrumentation for Impact Test – Part 1- Electronic Instrumentation*, SAE J211-1 Rev. JUL2007.
- [4] International Standard, *Road Vehicles - Measurement Techniques In Impact Tests - Instrumentation*, ISO 6487:2000(E).
- [5] International Test Operations Procedure, *FR/GE/UK/US Testing With Anthropomorphic Test Devices (ATAs)*, ITOP No: 1-2-505.
- [6] Endevco Technical Paper 299, *Minimizing Measurement Uncertainty In Calibration And Use Of Accelerometers*, Endevco TP 299.
- [7] Patric L. Walter, *Air-Blast And The Science Of Dynamic Pressure Measurement*, PCB Piezotronics.
- [8] Heintz H. Brinkmann, *Techniques And Procedures For The Measurement Of Impulse Noise*, Wehrtechnische Dienststelle fur Waffen und Munition.

**PROBLEMS OF MEASUREMENTS OF PHYSICAL
PARAMETERS DURING VEHICLES BLAST TESTS AND AREAS WHICH
ARE THE MOST PROBLEMATIC DURING OF NON-STATIONARY TESTS
WITH ATD – HYBRID III**

Summary

In the article are presented problems of measurements of physical parameters during vehicles blast tests. Introduction of the article describes standards in this area. There are described test devices and measurement systems and evaluation criteria are indicated. The next part of article describes methods of synchronizations of acquisition system and blast initiation, methods of fixing transducers, problems with safe distance signals transmission and analysis of received results. The practical solutions of these problems based on tests conducted by Department of Expert's Opinions on Materials for Weapons and Equipment of Military Institute of Armoured and Automotive Technology. Basing on experience gained during tests with dummy (Anthropomorphic Measurement Device – Hybrid III) the most important practical remarks are described. The article indicates the areas which are the most problematic according to non-stationary conditions of test and indicates practical solutions of these problems.

Key words: *air blast measurement, anthropomorphic device – Hybrid III*

Artykuł recenzował: dr hab. inż. Tadeusz SMOLNICKI, prof. nadzw. PWr