



WYZNACZANIE PARAMETRÓW ROBOCZYCH SPŁONEK TYPU JED POBUDZANYCH ALTERNATYWNYMI METODAMI

IDENTIFICATION OF WORKING PARAMETERS OF JED TYPE DETONATORS IGNITED BY ALTERNATIVE METHODS

Andrzej DŁUGOŁĘCKI, Andrzej FARYŃSKI, Tomasz KLEMBĄ,
Tomasz KWASŃIAK, Zbigniew ZIÓŁKOWSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa
Air Force Institute of Technology, 6 Księcia Bolesława St., 01-494 Warsaw, Poland
Author's e-mail address: andrzej.farynski@itwl.pl; ORCID: 0000-0003-1232-2747

Piotr KRZEMIŃSKI

MESKO S.A., ul. Legionów 122, 26-111 Skarżysko-Kamienna
MESKO S.A., 122 Legionów St., 26-111 Skarżysko-Kamienna, Poland

DOI 10.5604/01.3001.0013.5888

Streszczenie: W artykule przedstawiono dwa układy pobudzania wysokonapięciowych spłonek elektroiskrowych (JED): transformatorowy i bezpośredni. Dla spłonek po 20–30 –letnim okresie przechowywania wyznaczono progowe napięcia pobudzenia $2\div 3,5$ kV (za pomocą układu transformatorowego) i wartości opóźnienia zadziałania (w obu układach), które wyniosły $1,7\pm 0,05$ μ s. Pomiary prowadzono za pomocą układu i metod opracowanych w ITWL.

Słowa kluczowe: fizyka wybuchu, spłonka elektroiskrowa, opóźnienie zadziałania

1. Wstęp

W licznych rozwiązaniach konstrukcyjnych urządzeń wybuchowych takich, jak np.: jedno- i dwustopniowe ładunki kumulacyjne (Wolski, 2018), wybuchowe generatory impulsów prądowych (Demidov i in., 2015) układy generatorów supersilnych fal uderzeniowych (Derentowicz, Kaliski, 1979) niezbędne jest zainicjowanie detonacji w wielu punktach, w ustalonej sekwencji czasowej i z dokładnością czasu inicjacji od kilku do kilkudziesięciu nanosekund. Spełnienie tych wymagań przy użyciu typowych elektrycznych spłonek opartych o metaliczny mostek grzany ciepłem Joule'a

Abstract: The paper presents two systems for initiation of high voltage electric spark caps (JED) by a transformer or in a direct way. For the primers after 20-30 years of storing a threshold voltage of initiation was established at magnitude of $2\div 3.5$ kV (for transformer system) as well as the delay values for 1.7 ± 0.05 μ s. The measurements were made by using the system and methods developed in the Air Force Institute of Technology (AFIT).

Keywords: physics of explosion, electric spark detonator (primer, cap), activation delay time

1. Introduction

Detonation of numerous designs of explosive devices such as single and double-stage shaped charges (Wolski, 2018), explosive generators of electric current pulses (Demidov et al., 2015) systems of generators of super-strong impact waves (Derentowicz, Kaliski, 1979) and many others has to be initiated in many points and with a set time sequence at the accuracy of a few to dozens of nanoseconds. Fulfilment of these requirements by typical electric caps based on a metallic bridge heated by the Joule's heat

jest niemożliwe nawet przy odpalaniu wysokonapięciowym - rozrzuty czasowe ich zadziałania wynoszą od kilkunastu do kilkuset mikrosekund.

Przyczyną tak dużych rozrzutów czasowych jest termiczne (płomieniowe) materiałów inicjujących, stosowane w typowych spłonkach materiałów inicjujących.

Stosowane są również spłonki, w których do bezpośredniej inicjacji materiałów kruszących wykorzystuje się falę uderzeniową generowaną przez elektrowybuch przewodników (cienkie folie lub druty metalowe). Zrealizowanie takiego mechanizmu inicjacji wymaga jednak użycia specjalnych wysokonapięciowych i wysokoprądowych zapalarek, a rejestrowane rozrzuty czasu inicjacji są rzędu kilku mikrosekund.

Od wyżej wspomnianych wad wolne są spłonki elektroiskrowe, w których warstwa materiału inicjującego (MI) - przeważnie azydku ołowiu - pobudzana jest do detonacji na drodze synergicznego oddziaływania fali uderzeniowej i wysokiej temperatury, generowanych na powierzchni MI w elektrycznym wyładowaniu wysokonapięciowym. Energia takiego wyładowania jest niewielka i wynosi ok. 1 mJ (odpowiada energii zgromadzonej w kondensatorze o pojemności 150 pF naładowanym do napięcia 3 kV, co sprawia, że spłonki takie są wrażliwe na elektryczność statyczną). Dla przykładu, o ile do pobudzenia ładunku (układu ładunków) kumulacyjnego wystarczą 1-2 spłonki elektroiskrowe, to w (Demidov i in., 2015) 10 takich spłonek, działających z rozrzutem < 100 ns uruchamiało 10 dyskowych wzmacniaczy prądu elektrycznego, który po pewnym czasie był przerywany przez cylindryczną falę detonacyjną inicjowaną przez dalszych kilkanaście spłonek, jednocześnie pobudzonych na osi walca, zaś w (Derentowicz, Kaliski, 1979) falę detonacyjną w kształcie dwóch stożków złączonych podstawami inicjowało 48 spłonek jednocześnie pobudzanych, przy czym jednoczesność oznaczała rozrzuty czasowe zadziałania ~ 10 ns. Do zainicjowania tych spłonek przeważnie wykorzystuje się impulsy wysokonapięciowe generowane przez elementy piezoelektryczne poddane obciążeniu mechanicznemu (rozwiązanie stosowane w przeciwpancernych ładun-

is impossible even at the high voltage initiation – the time spread of their activation is from a dozen to a few hundred microseconds.

The reason of such large time dispersion is the thermal (flame) activation of the initiating materials deployed in typical caps.

There are also caps deploying a direct initiation of high explosive materials by the impact wave generated by an electro-detonation of conductors (thin foils or metallic wires). But the realisation of such initiating mechanism requires some special high-voltage and high-current igniters to be used whereas the order of recorded spread of activation times is a few microseconds.

Electric spark caps are free of the mentioned drawbacks as a layer of the initiating material (IM) – usually lead azide – is initiated to detonation by a synergic action of the impact wave and high temperature, generated on the surface of the IM at a high voltage electric discharge. The energy of such discharge is not high and equals to ca. 1 mJ (it corresponds to energy stored in 150 pF capacitor when loaded at 3 kV what makes these caps are sensitive to static electricity). For instance, for initiation of a shaped charge (system of charges) the use of 1-2 electric spark caps is sufficient, but in (Demidov et al., 2015) 10 such caps operating with the spread < 100 ns activate 10 disc amplifiers of electric current, which after some time is interrupted by a cylindrical detonating wave initiated by a dozen of other caps detonated at the same time on the axis of the cylinder, and moreover in (Derentowicz, Kaliski, 1979) the detonating wave having the form of two cones connected by bases was initiated by 48 caps detonated simultaneously with the spread of activation times at ~ 10 ns. These caps are mostly detonated by using high voltage pulses generated by piezoelectric components subjected to mechanical loads (the solution deployed in antitank shaped charges – very low time delay

kach kumulacyjnych - bardzo małe opóźnienie czasowe zapewnia detonację ładunku w wymaganej optymalnej odległości od przeszkody); układy typu opisanych w (Demidov i in., 2015; Derentowicz, Kaliski, 1979), pobudza się z odpowiednich baterii kondensatorów.

Celem pomiarów przeprowadzonych w ramach tej pracy było wyznaczenie rozrzutów czasu opóźnienia (zadziałania) i rozrzutów napięcia przebicia elektroiskrowych spłonek JED po ich wieloletnim (ok. 20 - 30 lat) magazynowaniu. Zaproponowano również transformatorowy sposób ich pobudzania, w założeniu zmniejszający wrażliwość na elektryczność statyczną układu, w którym działają.

2. Opis pomiarów

Pomiary obejmowały egzemplarze trzech partii spłonek JED oznaczonych następująco: 6/89-3Ż2, 3/90-3Ż2 i 2/95-3Ż1.

Badania przeprowadzono stosując dwa typy generatorów impulsów wysokonapięciowych: ze sprzężeniem transformatorowym (p. 2.1.) i ze sprzężeniem bezpośrednim (p. 2.2.).

2.1. Sprzężenie transformatorowe

Schemat blokowy stanowiska pomiarowego do wyznaczenia napięcia przebicia i czasu opóźnienia spłonek IED przy tym sprzężeniu pokazano na rys. 1.

provides the detonation of the charge in optimal distance from the target); the systems such as described in (Demidov et al., 2015; Derentowicz, Kaliski, 1979) are initiated with suitable batteries of capacitors.

The measurements presented in the paper are aimed to identification of the dispersion of time delays (activation) and the breakdown voltage of electric spark caps JED after a long term storing (ca. 20 – 30 years). Moreover, their initiation by a transformer was proposed to diminish the vulnerability to the static electricity for the unit they are deployed to.

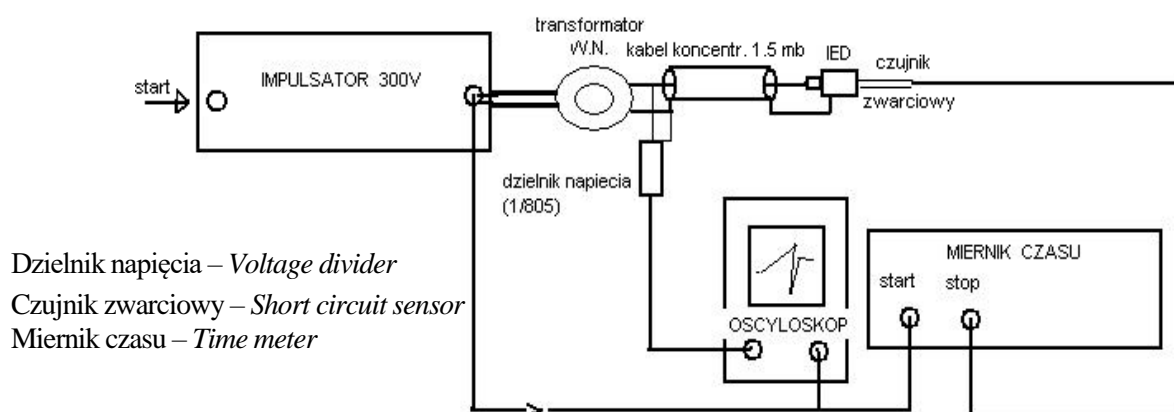
2. Description of Measurement

The measurements were made for samples of three lots of JED caps marked as: 6/89-3Ż2, 3/90-3Ż2 and 2/95-3Ż1.

Tests were carried out by using two types of high voltage generators: with transformer coupling (p. 2.1.) and with direct coupling (p. 2.2.).

2.1. Transformer Coupling

The block diagram of a setup measuring the breakdown voltage and delay time of IED caps for such coupling is shown in Fig. 1.

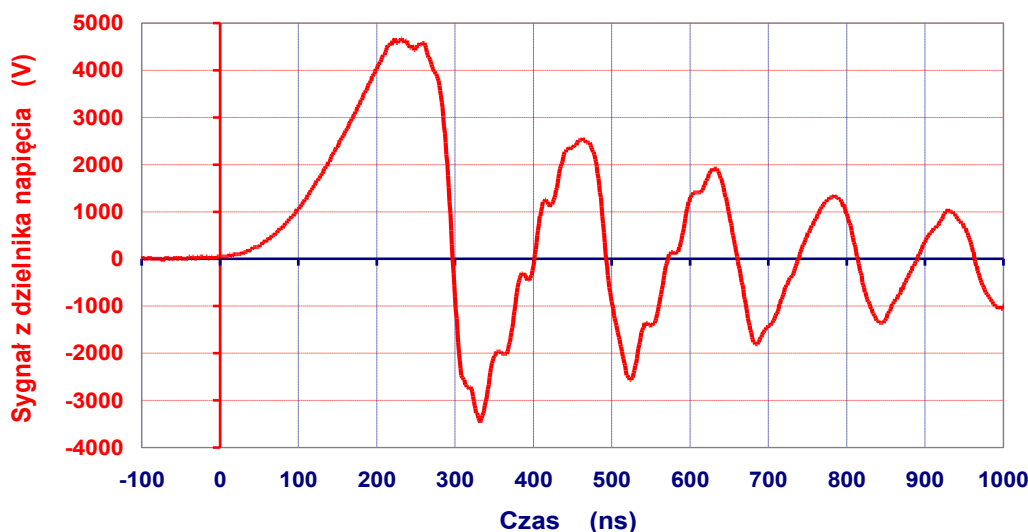


Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przy pobudzeniu ze sprzężeniem transformatorowym

Fig. 1. Block diagram of the measurement setup for initiation by transformer coupling

Impuls wysokiego napięcia powstawał w obwodzie wtórnym niewielkiego toroidalnego transformatora ferrytowego, w którego obwodzie pierwotnym płynął impuls rozładowania kondensatora $0.5 \mu\text{F}$ naładowanego do napięcia 300 V . Transformator ten ładował odcinek kabla koncentrycznego 50Ω o długości 150 cm (co stanowi pojemność ok. 150 pF) do napięcia ponad 4 kV . Przykładowy oscylogram impulsu napięciowego generowanego w układzie z rys. 1 przedstawiono na rys. 2.

The pulse of high voltage was generated in the second winding of a small toroidal ferrite transformer whereas in its primary circuit a discharging pulse of $0.5 \mu\text{F}$ capacitor loaded to voltage of 300 V has flown. The transformer loaded a 150 cm section of 50Ω concentric cable (with capacity ca. 150 pF) to voltage above 4 kV . Exemplary oscillogram of the voltage pulse generated in the circuit from Fig. 1 is shown in Fig. 2.



Rys. 2. Oscylogram impulsu W.N. generowanego przez układ pokazany na rys. 1.

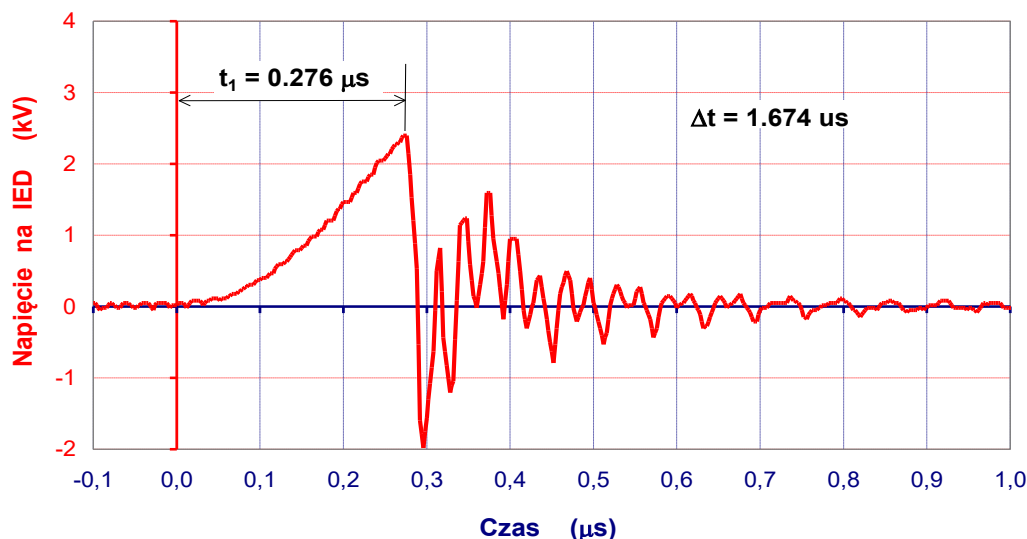
Fig. 2. Oscillogram of the high voltage (HV) pulse generated by circuit shown in Fig. 1

Impuls wysokiego napięcia osiągał amplitudę przekraczającą 4600 V i charakteryzował się czasem narastania $t_1 \approx 200 \text{ ns}$. Podanie takiego impulsu na elektrody spłonki JED powodowało wystąpienie między nimi przebicia elektrycznego i w efekcie detonację materiału pirotechnicznego. Rejestracja oscyloskopowa impulsu podawanego na JED - i równoległe na wejście oscyloskopu przez pojemnościowy dzielnik napięcia o podziale $1:805$ - pozwoliła odczytać faktyczne napięcie przebicia U_{max} , co pokazano na rys. 3.

W oparciu o rejestracje oscyloskopowe możliwe jest jednoczesne wyznaczenie napięcia przebicia JED (w przypadku rys.3 $U_{\text{max}} = 2.4 \text{ kV}$) oraz wyznaczenie zwłoki czasowej od momentu przebicia do wystąpienia zwarcia czujnika zwarciovego umieszczonego bezpośrednio (na styk) przy denku JED. Sposób umieszczenia czujnika zwarciovego pokazano na rys. 4.

The high voltage pulse has reached the amplitude above 4600 V and has the rise time $t_1 \approx 200 \text{ ns}$. Application of such pulse into electrodes of JED cap effected the electric breakdown and detonation of pyrotechnic material. Oscilloscope record of the pulse applied to JED, and parallelly to the oscilloscope input through the capacity voltage divider having the ratio $1:805$, gives the reading of a real breaking voltage U_{max} shown in Fig. 3.

Basing on oscilloscope recordings it is possible to identify the breakdown voltage for JED (in the case of Fig.3 - $U_{\text{max}} = 2.4 \text{ kV}$) and the time delay passing from the breakdown moment to the short-circuiting of the short sensor placed directly (direct contact) at the JED base. Fig. 4 shows a way the short sensor is fixed.



Rys. 3. Oscylogram impulsu W.N. dla przypadku przebicia przerwy iskrowej w JED
Fig. 3. Oscillogram of high voltage pulse in the case of breakdown through JED spark gap



Rys. 4. Wygląd zestawu pomiarowego
Fig. 4. The measurement setup

Czas Δt opóźnienia zadziałania JED jest różnicą czasu, odczytanego z miernika czasu (chwila zwarcia czujnika zwarciego) oraz czasu t_1 narastania impulsu wysokiego napięcia do momentu przebicia w JED, odczytanego z rejestracji oscyloskopowej. W oparciu o przykładowy oscylogram, pokazany na rys. 3, czas opóźnienia zadziałania JED wynosił:

Delay time Δt of the JED activation is the time difference between time read out from the time meter (the instance of shorting the short sensor) and time t_1 for the rise of the high voltage pulse until the moment of JED breakdown, which is read out from the oscilloscope record. Basing on the exemplary oscillogram, shown in Fig. 3, the JED activation delay time was:

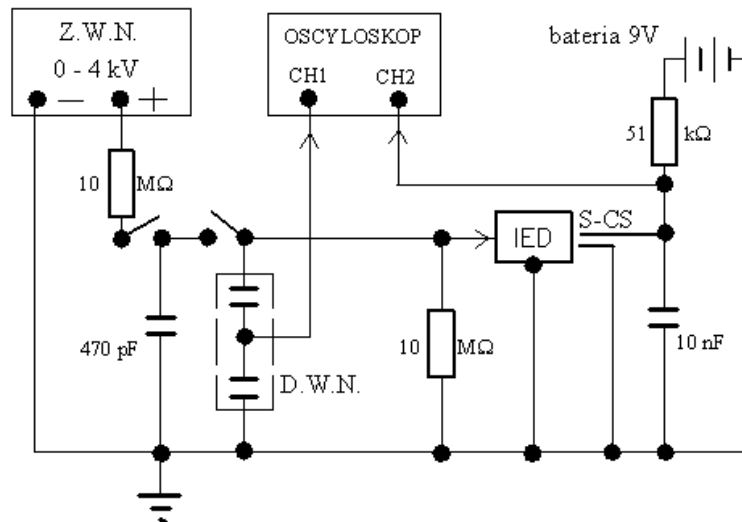
$$\Delta t = t_2 - t_1 = (1.95 - 0.276) \mu\text{s} = 1.67 \mu\text{s} \pm 0.01 \mu\text{s}$$

2.2. Sprzężenie bezpośrednie

W drugim stosowanym w pomiarach typie generatora, impuls wysokiego napięcia generowany był w układzie, którego schemat blokowy pokazano na rys. 5.

2.2. Direct Coupling

The second type of the circuit used for generation of high voltage pulse is presented in the block diagram in Fig. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego przy pobudzeniu ze sprzężeniem bezpośrednim; Z.W.N.-zasilacz wysokiego napięcia, D.W.N. – dzielnik wysokonapięciowy o podziale 1:805, S-CS – czujnik zwarciov

Fig. 5. Block diagram of the measurement setup with a direct coupling detonation; Z.W.N.- high voltage supply, D.W.N. – high voltage divider with the ratio 1:805, S-CS – short-circuit sensor

W opisanym typie generatora, kondensator ceramiczny o pojemności 470 pF ładowany był z zasilacza W.N do napięcia 3.5 kV, a następnie przy użyciu przekaźnika wysokonapięciowego przełączany był do linii dwuprzewodowej dołączonej do elektrod JED. Do linii tej dołączony był również pojemnościowy dzielnik napięcia o podziale 1:805. Sygnał z dzielnika napięcia wyzwał podstawę czasu oscyloskopu i był rejestrowany w kanale CH1, sygnał napięcia polaryzacji czujnika zwarciov rejestrowany był w kanale CH2 oscyloskopu.

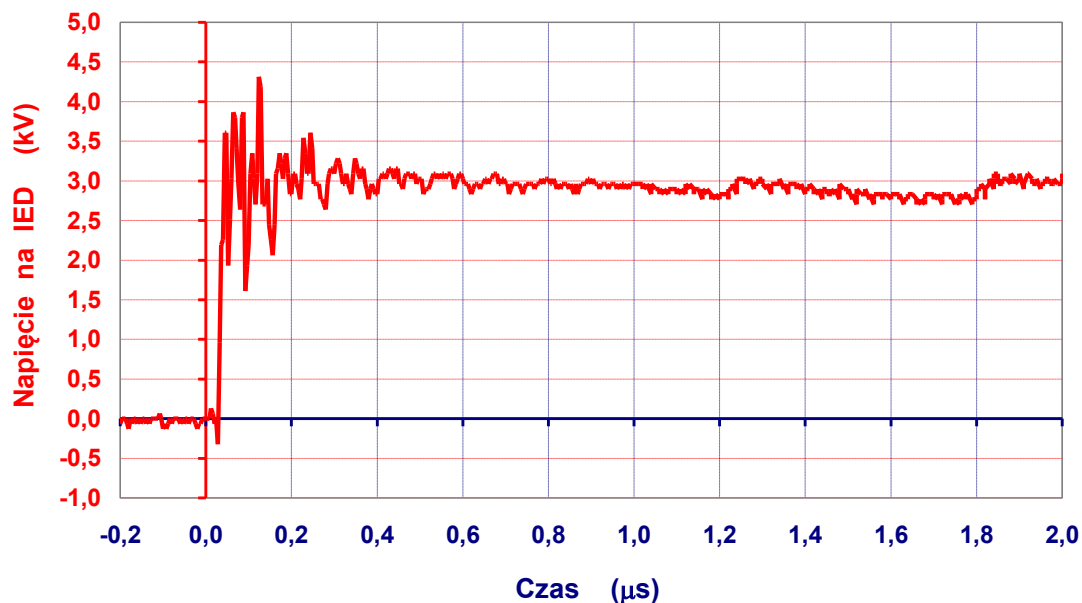
Przykładowy oscylogram dla przypadku braku przebicia (brak JED w obwodzie) pokazano na rys. 6.

W porównaniu z impulsem generowanym w układzie transformatorowym (por. rys. 2, 3.), sygnał przykładany do elektrod JED charakteryzuje się bardzo krótkim czasem narastania (kilku nanosekund) i wysokim poziomem zaburzeń spowodowanym niedopasowaniem falowym linii dwuprzewodowej (rozwartego lub zwartego po przebiciu końca linii).

Described type of generator uses a ceramic capacitor of 470 pF, which is loaded from the source of high voltage to 3.5 kV, to be switched next by a high voltage relay to a two wired line connected to JED electrodes. A capacity voltage divider with the division factor 1:805 is also connected to this line. A signal taken from the voltage divider triggers the oscilloscope time base and is recorded by channel CH1 whereas the short-circuit sensor polarisation voltage signal is recorded by channel CH2 of the oscilloscope.

An exemplary oscillogram for the case without any breakdown (lack of JED in the circuit) is shown in Fig. 6.

Comparing to the pulse generated by the transformer circuit (see Fig. 2, 3.) the signal applied to JED electrodes is characterised by a very short time of rising (a few nanoseconds) and by a high level of interferences caused by an unmatched wave impedance of the two-wired line (opened or shorted after the end line breakdown).

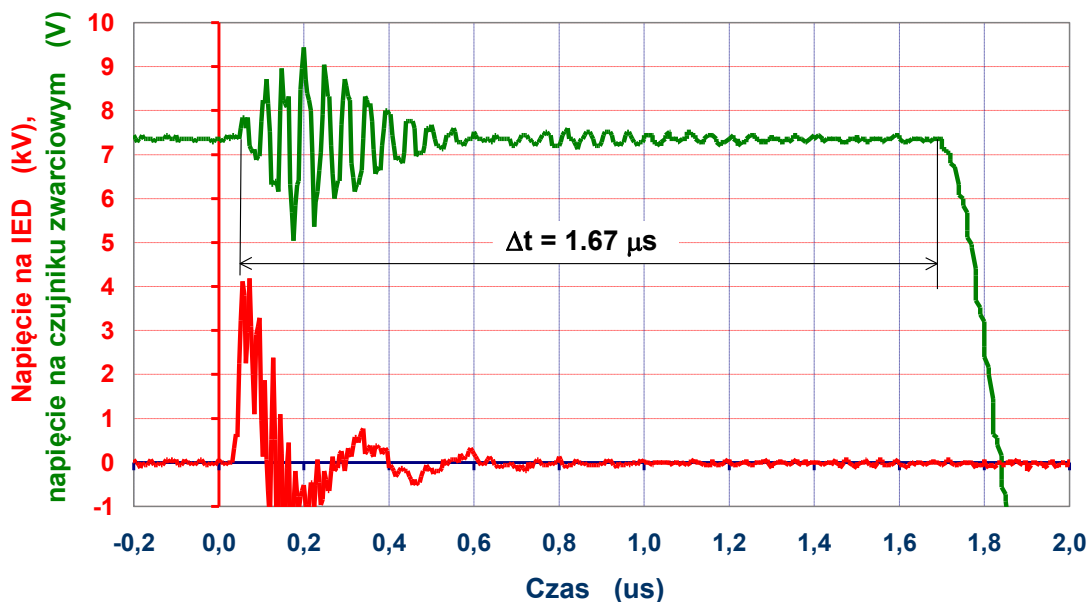


Rys. 6. Przykładowy oscylogram dla przypadku braku przebicia (brak JED w obwodzie)

Fig. 6. Exemplary oscillogram without any breakdown (lack of JED in the circuit)

Przykładowy zapis oscyloskopowy dla przypadku pobudzenia JED pokazano na rys. 7.

An exemplary oscilloscope picture for the case of JED detonation is shown in Fig. 7.



Rys. 7. Przykładowy oscylogram dla przypadku przebicia napięciowego JED: krzywa górna – napięcie na czujniku zwarciovym, krzywa dolna – inicjujący impuls wysokiego napięcia

Fig. 7. Exemplary oscillogram for JED voltage breakdown: upper line – voltage on the short-circuit sensor, bottom line – high voltage initiating pulse

Duży poziom zaburzeń w chwili przebiecia nie pozwala na dokładne określenie napięcia przebiecia JED (możliwe jest jedynie przybliżone określenie wartości tego napięcia). Rejestracja napięcia na czujniku zwarciowym pozwala jednak na dokładne określenie czasu Δt opóźnienia zadziałania JED, którego sposób odczytu pokazano na rys. 7.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Sprzężenie transformatorowe (transformatorowy układ odpalania)

Zbiornicze oscylogramy dla serii badanych spłonek pokazano odpowiednio na:

- rys. 8 – partia 6/89-3Ż2;
- rys. 9 – partia 3/90-3Ż2;
- rys. 10 – partia 2/95-3Ż1.

Wartości czasu narastania t_1 i napięcia przebiecia U_{\max} impulsu inicjującego oraz zwłoki czasowej zadziałania Δt były wyznaczone w sposób omówiony w punkcie 2.1. Wartości te dla każdej próby wraz z odpowiadającymi im wartościami średnimi i odchyleniami standardowymi, zamieszczono odpowiednio w tabelach 1, 2 i 3.

The high level of interferences in the moment of breakdown does not allow for an accurate determination of the breakdown voltage for JED (an estimation of this voltage is only possible). But the recording of the voltage on the short-circuit sensor provides the accurate identification of JED activation delay time Δt in a way illustrated in Fig. 7.

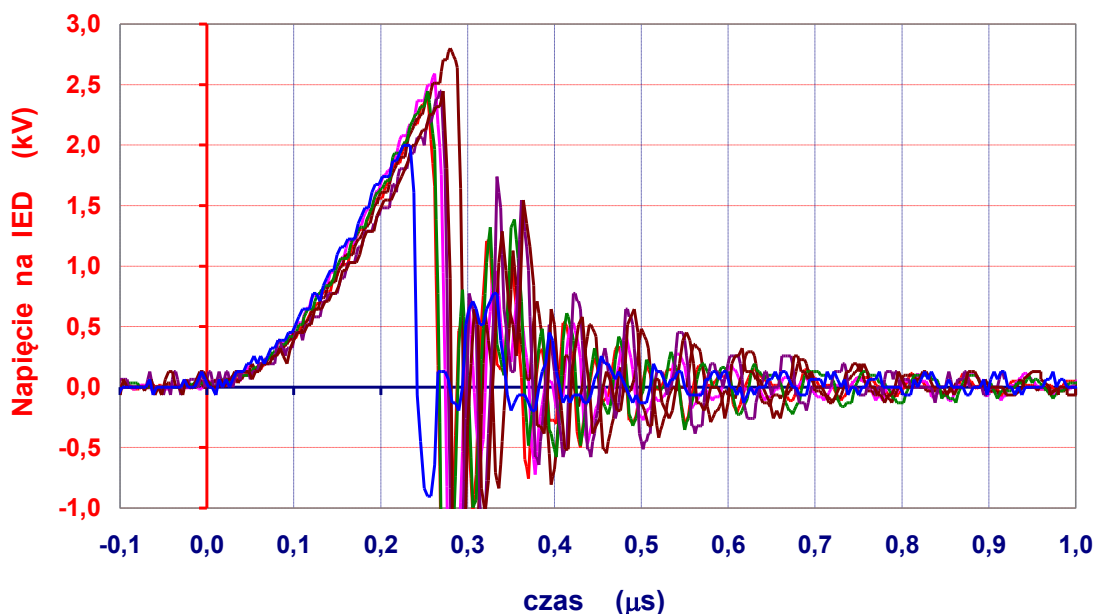
3. Measurement results

3.1. Transformer Coupling (Transformer Igniter)

Collective oscillograms for the series of tested caps are shown respectively in:

- Fig. 8 – lot 6/89-3Ż2;
- Fig. 9 – lot 3/90-3Ż2;
- Fig. 10 – lot 2/95-3Ż1.

The values of rising time t_1 and breakdown voltage U_{\max} of the initiating pulse and the activation delay time Δt were identified in a way described in point 2.1. These values are shown respectively in tables 1, 2 and 3 for each trial together with corresponding mean values and standard deviations.



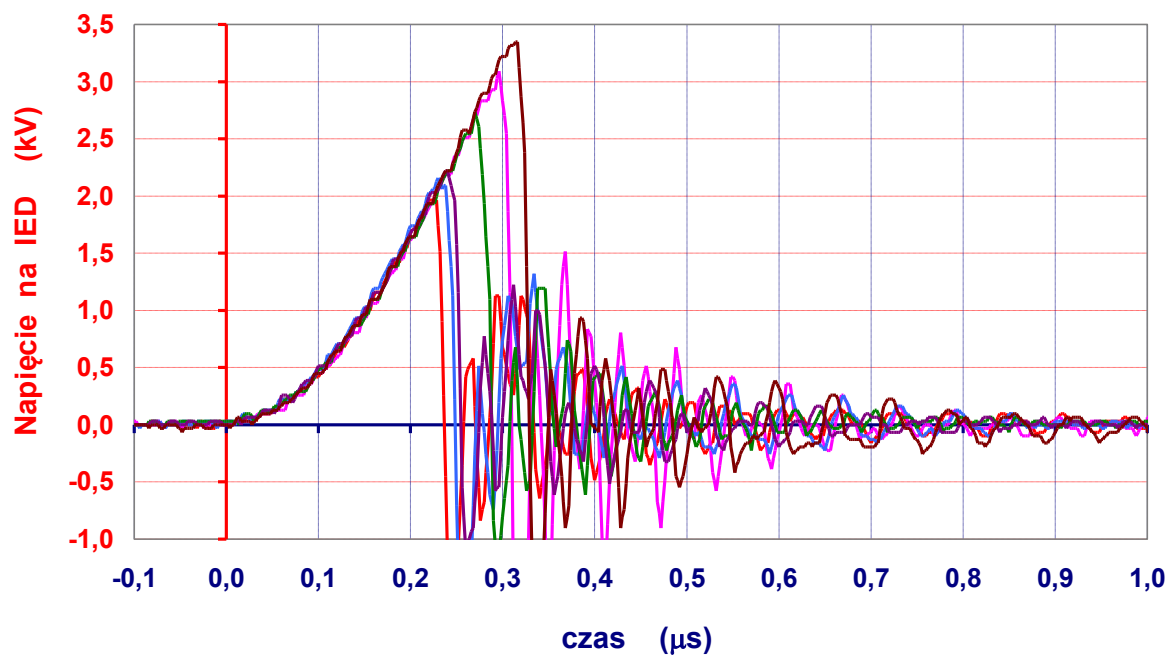
Rys. 8. Zbiorniczy oscylogram dla partii JED - 6/89-3Ż2

Fig. 8. Combined oscillogram for the lot JED - 6/89-3Ż2

Tabela 1, partia 6/89-3Ż2

Table 1, lot 6/89-3Ż2

Nr próby <i>Trial No</i>	$t_1, \mu\text{s}$	$\Delta t, \mu\text{s}$	$U_{\text{max}}, \text{kV}$
1	0,288	1,58	1,87
2	0,36	1,6	2,44
3	0,348	1,62	2,4
4	0,254	1,7	2,35
5	0,284	1,6	2,8
6	0,264	1,63	2,59
7	0,256	1,66	2,45
Wartości średnie <i>Mean values</i>	0,293 (+0.067 / -0.039)	1,63 (+0.069 / -0.045)	2,44 (+0.36 / -0.57)
Odchylenie stadardowe <i>Standard deviation</i>	0,04	0,038	0,24



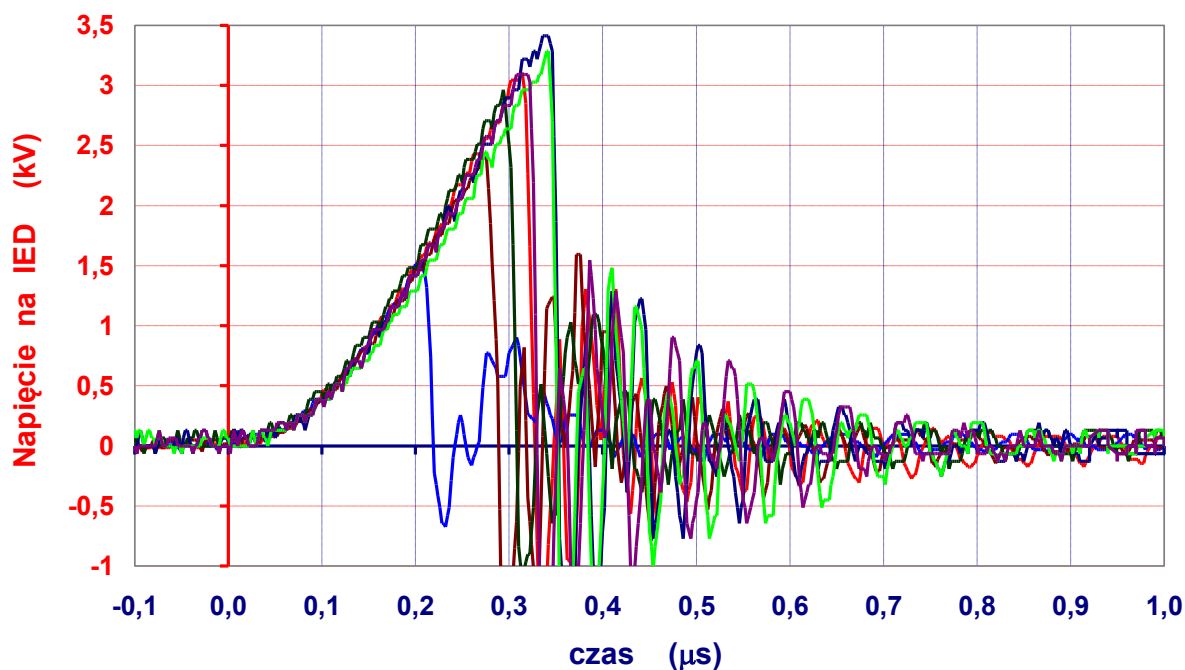
Rys. 9. Zbiór oscylogram dla partii JED – 3/90-3Ż2

Fig. 9. Combined oscillogram for the lot JED – 3/90-3Ż2

Tabela 2, partia 3/90-3Ż2

Table 2, lot 3/90-3Ż2

Nr próby <i>Trial No.</i>	t_1 , μs	Δt , μs	U_{max} kV
1	0,316	1,65	3,35
2	0,244	1,71	2,22
3	0,272	1,7	2,64
4	0,236	1,63	2,06
5	0,296	1,59	3,06
6	0,228	1,68	1,96
Wartości średnie <i>Mean values</i>	0,265 (+0.051 / -0.037)	1,66 (+0.045 / -0.067)	2,55 (+0.80 / -0.59)
Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	0,036	0,039	0,32



Rys. 10. Zbiorczy oscylogram dla partii JED – 2/95-3Ż1

Fig. 10. Combined oscillogram for the lot JED – 2/95-3Ż1

Tabela 3, partia 2/95-3Ż1

Table 3, lot 2/95-3Ż1

Nr próby / Trial No.	$t_1, \mu\text{s}$	$\Delta t, \mu\text{s}$	$U_{\text{max}}, \text{kV}$
1	0,304	1,8	3,03
2	0,32	1,87	3,28
3	0,32	1,81	3,28
4	0,292	1,67	2,83
5	0,276	1,67	2,38
6	0,212	1,68	1,48
7	0,316	1,74	3,03
Wartości Średnie / Mean values	0,291 (+0.029 / -0.079)	1,74 (+0.121 / -0.081)	2,76 (+0.52 / -1.28)
Odchylenie standardowe / Standard deviation	0,036	0,074	0,51

3.2. Sprzężenie bezpośrednie (kondensatorowy układ odpalania)

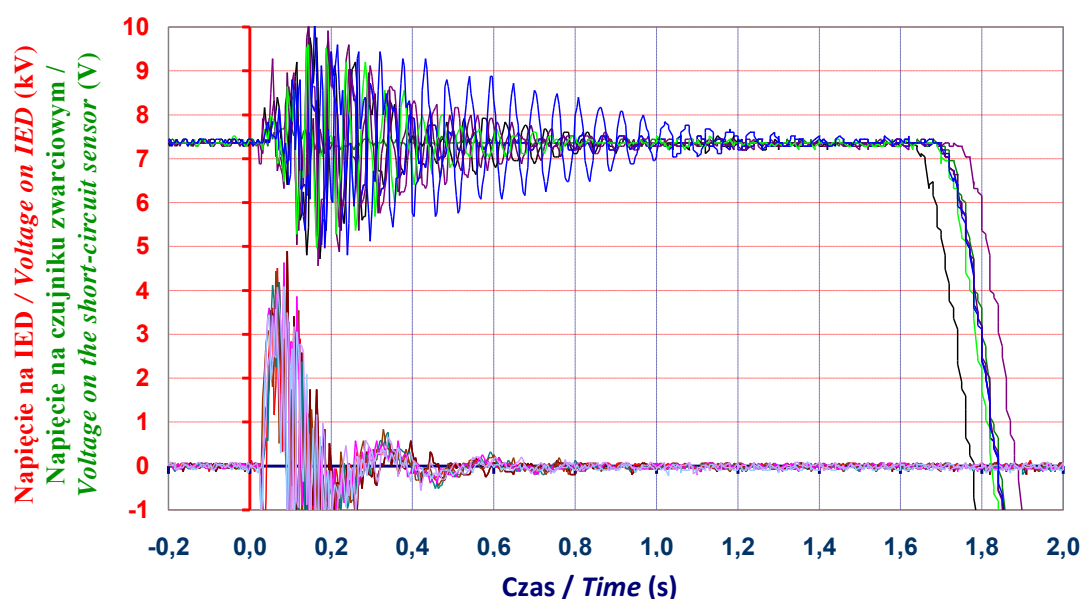
Partia JED 2/95-3Ż1

Zbiorczy oscylogram dla tej serii splonek inicjowanych w układzie kondensatorowym (por. rys. 5.) pokazano na rys. 11. W trakcie pomiarów wyznaczono wartości czasu opóźnienia zadziałania, które wraz z ich wartością średnią i odchyleniem standardowym zostały zamieszczone w tabeli 4.

3.2. Direct Coupling (Capacitor Igniter)

Lot JED 2/95-3Ż1

Combined oscillogram for this lot of caps initiated by the capacitor system (see Fig. 5) is shown in Fig. 11. During the measurements the activation time delays were identified to be presented in table 4 with the mean value and standard deviation.



Rys. 11. Zbiorczy oscylogram dla partii JED – 2/95-3Ż1 inicjowanych w układzie kondensatorowym

Fig. 11. Combined oscillogram for the lot JED – 2/95-3Ż1 initiated by a capacitor circuit

Nr próby / <i>Trial No.</i>	Δt , μs
1	1,664
2	1,664
3	1,670
4	1,730
5	1,670
6	1,614
7	1,666
Wartości średnie / <i>Mean values</i>	1,668 (+0,062 / -0,054)
Odchylenie standardowe / <i>Standard deviation</i>	0,034

Tabela 4
Opóźnienie zadziałania Δt dla partii 2/95-3Ż1

Table 4
Delay time Δt for the lot 2/95-3Ż1

4. Wnioski

1. Niezależnie od serii produkcyjnej JED wartość napięcia inicjacji zawierała się w przedziale $U_{\max} = 2 \div 3.5$ kV.
2. Czas opóźnienia zadziałania JED niezależnie od serii produkcyjnej mieścił się w zakresie $\Delta t = 1,7 \mu s \pm 0,05 \mu s$. Należy jednak zauważyć, iż w przypadku inicjowania w układzie transformatorowym należy dodatkowo uwzględnić czas narastania napięcia do wartości napięcia przebicia U_{\max} – po jego uwzględnieniu występujący rozrzut czasu i wartości napięcia przebicia zwiększy rozrzut czasu opóźnienia zadziałania o ok. $0,1 \mu s$.
3. Dodatkowych badań wymaga określenie wrażliwości układu zawierającego spłonkę IED na wpływ zewnętrznych pól elektromagnetycznych.

4. Conclusions

1. The value of the initiating voltage was in interval $U_{\max} = 2.0 \div 3.5$ kV independently of the JED manufacture lot.
2. The activation delay time for JED was independent on the manufacturing lot and was in the range $\Delta t = 1.7 \mu s \pm 0.05 \mu s$. Anyway, it has to be noted that in the case of initiation by the transformer system the voltage rising time to the value of voltage breakdown U_{\max} has to be additionally considered – after accounting this the dispersion of the activation time delay increases by ca. $0.1 \mu s$.
3. Additional tests are needed to identify the vulnerability of the system including the IED cap on the external electromagnetic fields.

Literatura / Literature

- Demidov, V.A. et al. (2015). Disk Magnetocumulative Generator with an Explosive Opening Switch, *Journ. Appl. Mech. & Techn. Phys.* 56.1.
- Derentowicz, H., Grygoruk, L., Jach, K., Wróbel J. i Ziółkowski Z. (1981). Badania doświadczalne bistożkowego układu wybuchowego mikrosyntezy termojądrowej, *Biuletyn WAT, Rok XXX*, 3.
- Derentowicz, H., Kaliski, S. (1979). An Experimental Biconical System for Explosion Mi-

rofusion of Plasma, *Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Tech., Vol. XXVII, 2.*

Wolski, J. (2018). Czołgowa amunicja kierowana, *Nowa Technika Wojskowa, Nr 4* oraz *Nowa Technika Wojskowa, Nr 5.*

Praca została wykonana w ramach projektu Nr DOB-1-1/1/PS/2014
The work has been executed in the frame of project Nr DOB-1-1/1/PS/2014

